République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté Sciences et Technologie
Département Génie Mécanique

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCE

Filière : Génie Mécanique

Présentée par

CHIHAOUI SALIM

Intitulée

Evaluation des performances des outils en CBN revêtus lors de l'usinage à sec de la fonte grise- Approche statistique et optimisation multi objectifs

Soutenue le : Juin 2021 Devant le Jury composé de :

Pr Haddad Abdelkrim	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Président
Pr Yallese Mohamed Athmane	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
Dr Belbah Ahmed	MCA	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Co-encadreur
Pr Bey Kamel	Professeur	Univ. de Badji mokhtar Annaba	Examinateur
Pr Laouar Lakhdar	Professeur	Univ. de Badji mokhtar Annaba	Examinateur
Dr Meddour Ikhlas	MCA	ENST. Bordj El Kiffan, Algier	Examinateur
Dr Belhadi Salim	MCA	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Invité

Année Universitaire : **2020/2021**

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse :

A mon maître de passion, de patience et de persévérance . . . Mon père, A ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction . . . Ma mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

À ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Ma femme qui m'à tant soutenu et encouragé ;

Mes chers enfants, à qui je souhaite plein de succès, AYA, MOHAMED ANES wa AHMED ;

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes amis ;

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier notre ***DIEU****, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (****LMS****) de l'université de Guelma sous la direction de Monsieur le professeur* ***YALLESE Mohamed Athmane****, qui a fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration. Je remercie aussi vivement mon co-directeur de thèse Mr.* ***BELBAH AHMED*** *Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 guelma pour ses conseils et pour son soutien durant ces années.*

*Je tiens à remercier Mr.****, HADDAD ABDELKRIM****, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de Guelma, de l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.*

Je remercie vivement Messieurs ***: BEY KAMAL****, Professeur à l'Université de Annaba,* ***LAOUARE LAKHDAR*** *Professeur à l'Université de Annaba, et* ***MEDDOUR IKHLAS*** *Maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure de Technologie pour avoir accepté la tâche d'examinateurs, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux de thèse.*

Mes sincères remerciements à Messieurs : ***BELHADI Salim****, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Pour son aide et ses conseils durant la réalisation de ma thèse de Doctorat.*

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail et particulièrement Ms: ***Safi Khaoula*** *et à tous les membres, les thésards et l'ingénieur du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS)* ***Mr. OUERFELLA Rabeh****.*

RÉSUMÉ

L'un des objectifs principaux des industries manufacturières d'aujourd'hui réside dans la minimisation des coûts inhérents aux opérations d'usinage. Dans ce cadre, le choix des matériaux de coupe est décisif, et joue un rôle primordial dans l'amélioration de la productivité. L'étude expérimentale présente, pertinente particulièrement aux opérations de modélisation et d'optimisation, a été réalisée aux fins d'évaluation des performances d'un outil en nitrure de bore cubique revêtu de TiN/PVD lors du tournage de la fonte grise EN-GJL-250.

Les travaux sont entamés par une étude paramétrique afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe, représentés par la vitesse de coupe (*Vc*), l'avance par tour (*f*) et la profondeur de passe (*Doc*), sur les critères de performances décrits par les efforts ainsi que la pression de coupe, la rugosité de surface et enfin la puissance de coupe. En outre, des essais d'usure de longue durée ont été réalisés dans le but d'étudier le comportement à l'usure de l'outil CBN pour trois vitesses de coupe égales à 450, 600 et 750 m/min. Une analyse topographique de la rugosité en 3D de la surface usinée a été par la suite réalisée pour différents paramètres de coupe et a permis de mettre en évidence la texture des surfaces.

Une étude statistique ayant pour but la détermination la contribution de chacun des paramètres de coupe ainsi que leurs interactions sur les paramètres de sortie représente la seconde partie du présent travail. Les méthodes d'analyse de la variance ainsi que celle de surface de réponse ont été appliquées. Le plan de Taguchi (L_{27}) adopté a favorisé en outre l'application de trois approches de modélisation notées *MSR*, *RNA* et *ANFIS* ayant permis la prédiction des différents paramètres de sortie représentés par *Fx*, *Fy*, *Fz*, *Ra*, *Rz*, *Rt* et *Pc*.

La troisième et dernière partie du travail réalisé s'est intéressée à accomplir une étude d'optimisation mono-objective selon l'analyse de Taguchi basée sur le rapport signal/bruit (S/N). Cinq méthodes d'optimisation représentées par les DFA, NSGA-II, GRA, DEAR et TOPSIS ont été appliquées aux fins de procéder à une optimisation multi-objective des paramètres de coupe qui permettrait l'optimisation simultanée des paramètres de sortie. Une comparaison entre les régimes optimaux obtenus par les différentes approches appliquées est enfin réalisée.

Mots-clés : Usinage, CBN, fonte grise, Modélisation, Optimisation.

ABSTRACT

One of the main goals of today's manufacturing industries concerns the minimization of the costs inherent to the machining operations. Within this context, the choice of the machining cutting materials is crucial, and plays a key role in improving productivity. The present experimental study, particularly relevant to both modeling and optimization operations, is carried out with the objective of evaluating the performance of TiN / PVD coated cubic boron nitride tool during the turning of gray cast iron EN- GJL-250.

The investigation started with a parametric study aiming to assess the influence of the cutting parameters represented by the cutting speed (*Vc*), the feed rate (*f*) and the depth of cut (*Doc*), on the performance criteria illustrated by the cutting forces and pressure, the surface roughness and finally the cutting power. Furthermore, long-term wear tests were carried out in order to examine the wear behavior of the CBN tool. This was performed for three cutting speeds (450, 600 and 750 m/min), and a 3D roughness topographic analysis of the machined surface was subsequently carried out for various cutting parameters leading to the characterization of the texture of the surfaces.

A statistical study aimed at determining the contribution of each of the cutting parameters as well as their interactions on the output parameters represents the second part of the present study. The analysis of variance (ANOVA) approach along with the response surface method (RSM) were employed. The Taguchi plan (L_{27}) endorsed supported the application of three modeling approaches denoted *MSR*, *RNA* and *ANFIS* that granted the prediction of the different output parameters represented by *Fx*, *Fy*, *Fz*, *Ra*, *Rz*, *Rt* and *Pc*.

The third and last part of the study carried out a single-objective optimization according to the Taguchi's analysis on the basis of the Signal-to-Noise ratio (S/N). A further multi-objective optimization of the cutting parameters that would allow the simultaneous optimization of the output parameters was performed via the application of five optimization methods represented by DFA, NSGA-II, GRA, DEAR and TOPSIS. A comparison between the optimal regimes collected by the different applied approaches was ultimately carried out.

Keywords: Machining, CBN, gray cast iron, Modeling, Optimization.

ملخص

من بين الأهداف الرئيسية للصناعات التحويلية اليوم هو التقليل من التكاليف الملازمة لعمليات التصنيع وفي هذا السياق ، يُعَد إختيار أدوات القطع أمرًا بالغ الأهمية حيث يلعب دورًا رئيسيًا في تحسين الإنتاجية. تهتم الدراسة التجريبية الحالية بشكل خاص بكلٍ من عمليات النمذجة والتحسين وتهدف إلى تقييم أداء أداة القطع المُصَنَعَة من نيتريد البورون المكعبة المطلية بـ TiN / PVD أثناء تحويل الحديد الزهر الرمادي الذي يُرمَز إليه ب EN-GJL-250.

تتعلق المرحلة الأولى من البحث بدراسة مُعاملاتية بهدف تقييم تأثير عوامل القطع المُتغيِرة والمتمثلة في سرعة القطع (*Vc*) ومعدل التغذية (*f*) وعمق القطع (*Doc*) على معايير الأداء المتمثلة في قوى القطع و الضغط وكذا خشونة السطح وأخيراً قوة القطع. بالإضافة إلى ذلك ، فقد تم إجراء إختبارات تآكل طويلة المدى لفحص سلوك التآكل لأداة (CBN) وذلك لثلاث سرعات قطع مختلفةٍ ومُمثِلةٍ في 450 و 600 و 750 م/دقيقة. كما تم في الأخير إجراء تحليل طوبوغرافي ثلاثي الأبعاد لخشونة السطح في حالة العديد من عوامل قطع المختلفة التي أدت إلى إبرازوتوصيف نسيج الأسطح.

ولقد تم القيام بدراسة إحصائية تهدف إلى تحديد مساهمة كل من عوامل القطع وكذا تفاعلاتها على المخرجات. ولقد تم إستخدام منهجيتا تحليل التباين (ANOVA) وكذا طريقة سطح الإستجابة (RSM) التي دعمت خطة تاجوتشي (L_{27}) بثلاثة طرق نمذجة مختلفةٍ هي (MSR)و(RNA) وأخيرًا (ANFIS) والتي سمحت بالتنبؤ بمختلف المخرجات المتمثلة في (*Fx*) و(*Fy*) و(*Fz*) و(*Ra*) و(*Rz*) و(*Rt*) و(*Pc*).

كما أجرى الجزء الثالث والأخير دراسةً أمثليةً أحادية الهدف وفقًا لتحليل (Taguchi) على أساس نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) كما تم إجراء تحسين إضافي متعدد الأهداف لعوامل القطع التي من شأنها أن تسمح بالتحسين المتزامن للمخرجات من خلال تطبيق خمس طرق تحسين ممثلة في (DFA) و(NSGA-II) و(GRA) و(DEAR) و(TOPSIS). ولقد تم أخيرًا إجراء مقارنة بين الأنظمة المُثلَى التي تم الحصول عليها من خلال الطرق المختلفة الآنية الذكر.

الكلمات المفتاحية: الخراطة ، التحسين ، التخطيط التجريبي ، CBN، فولاذ.

INDEX DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur l'usinage des métaux

CHAPITRE II : Procédure expérimentale

CHAPITRE III : Usinabilité de la fonte grise EN-GJL-250

Chapitre IV : Analyse statistique et prédiction des paramètres technologiques

CHAPITRE V : Optimisation mono et multi-objective des paramètre d'usinage

INDEX DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur l'usinage des métaux

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre III : Usinabilité de la fonte grise EN-GJL-250.

Chapitre V : Optimisation mono et multi-objective des paramètre d'usinage

Nomenclatures

Vc	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
Doc	Profondeur de passe [mm]
Fx (Fa)	Effort de coupe axial [N]
Fy (Fr)	Effort de coupe radial [N]
Fz (Ft)	Effort de coupe tangentiel [N]
$F_{rés}$	Effort de coupe résultant [N]
MRR	Volume de copeau enlevé (Débit de coupeau) [cm^3/min]
Pc	Puissance de coupe [kW]
Kc	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm^2]
HB	Dureté Brinell
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [µm]
Rt	Rugosité totale [µm]
Rq	Rugosité moyenne quadratique du profil [µm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [µm]
VB	Usure en dépouille [mm]
t	Temps d'usinage [min]
r_ε	Rayon de bec de l'outil [mm]
A	Section du copeau [mm^2]
ANOVA	Analyse de la variance
SS	Somme des carrés
MS	Les carrés moyens
Cont.%	Pourcentage de contribution
dl	Degré de liberté
F	Valeur de Fisher
R^2	Coefficient de détermination
RMSE	Racine moyenne des erreurs carrées
MAD	Erreur absolue moyenne
S/N	Rapport signale sur bruit [dB]
MSR	Méthodologie de surface de réponse
RNA	Réseau de neurones artificiels
ANFIS	système d'inférence neuro-flou adaptatif
GRA	Analyse Relationnelle Grise
GRC	Coefficient relationnel gris
GRG	Grade relationnelle grise
NSGA-II	algorithme génétique de tri non dominé
DEAR	méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données
TOPSIS	technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale

Symboles

χ_r	Angle de direction principal [°]

α	Angle de dépouille principal [°]
β	Angle de tranchant [°]
γ	angle d'attaque [°]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [°]
χ_r	Angle de direction principal [°]
α'	Niveau de signification

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les outils de coupe en nitrure de bore cubique CBN peuvent être classés parmi les matériaux de coupe modernes à haute performance. Ils sont en effet capables d'usiner des matériaux durs aux propriétés mécaniques élevées tout en assurant une bonne précision d'usinage, une productivité élevée et une longue durée de vie. Ils permettent également l'utilisation de conditions de coupe élevées. Ils sont donc recommandés pour l'usinage des aciers trempés et l'usinage de finition des fontes. Les fontes grises parmi les alliages métalliques dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. En raison de leur faible coût, de leurs excellentes propriétés mécaniques, de leur bonne caractéristique de frottement et d'usure, elles sont largement utilisées pour la fabrication de diverses pièces industrielles telles que les bagues, les entraînements, les engrenages, les brides, les poulies, les turbines ... etc. La fonte ayant une bonne résistance à l'usure et une excellente coulabilité. D'autre part, ces alliages possèdent des propriétés très élevées, comme la dureté et la difficulté d'usinage. Dans les entreprises de fabrication mécaniques algériennes, l'usinage des fontes avec le matériau « nitrure de bore cubique » est faiblement utilisé. Cette constatation a permis de faire une étude de performance sur l'utilisation du CBN lors de l'usinage de la fonte EN-GJL-250. Cette investigation sur le comportement à l'usinage du couple Fonte/CBN est suivie par une modélisation du processus et puis cette modélisation est couronnée par une optimisation des paramètres de coupe.

La thèse est structurée comme suit :

Le premier chapitre de la thèse présente une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux, des généralités sur la coupe des métaux à savoir, la définition de la coupe des métaux et les nouvelles perspectives de développement des matériaux à outils. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage des fontes, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes de modélisation et d'optimisation utilisées.

Dans le second chapitre on présente les équipements nécessaires à la réalisation des essais tels que, la machine-outil, les éprouvettes utilisées, les matériaux de coupe et les dispositifs de mesure. Les conditions expérimentales et le plan d'expérience utilisé sont également exposés.

Le troisième chapitre, est consacré à une étude des performances de l'outil CBN7050 revêtue par la méthode paramétrique. Cette étude concerne l'influence des paramètres de coupe (*Doc*, *f* et *Vc*) sur les efforts de coupe, la puissance de coupe et l'effort spécifique, ainsi que la rugosité

de surface lors du tournage de la fonte EN-GJL-250. L'évolution de l'usure en dépouille de l'outil CBN ainsi que l'analyse topographique de surface 2D et 3D ont été investigués.

Le quatrième chapitre est consacré à une étude de modélisation des composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*), des critères de la rugosité de surface (*Ra, Rz* et *Rt*) et la puissance de coupe (*Pc*). Les essais expérimentaux ont été planifiés suivant un plan de Taguchi de 27 essais (L_{27}). L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer et classifier des paramètres de coupe qui sont influents sur les réponses étudiées. La méthodologie des surfaces de réponse (MSR), l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) et la méthode du système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) ont été utilisées pour obtenir des modèles mathématiques de prédiction. Ensuite les valeurs prédictives des paramètres de sortie, obtenues par les trois méthodes (RSM, ANN et ANFIS) ont été comparées en termes de leur écart absolu moyen (*MAD*), l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et le coefficient de détermination (R^2).

Le dernier chapitre est réservé à l'optimisation des paramètres de coupe étudies dans les chapitres précédents. Nous avons appliqué l'optimisation mono et multi objectifs, en utilisant l'analyse de Taguchi basée sur le signal/bruit (S/N), l'approche de la fonction de désirabilité (DFA), l'algorithme génétique de tri non dominé -II (NSGA-II), l'analyse relationnelle grise (GRA), la technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale (TOPSIS) et la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR), afin de trouver un compromis entre diverses réponses (*Fz, Ra, Pc* et *MRR*). Ensuite une comparaison entre les régimes de coupes optimaux obtenus par les différentes méthodes utilisées a été réalisée.

En dernier lieu, la thèse de doctorat se termine par une conclusion générale suivie par les perspectives ouvertes par cette étude.

Chapitre I

Généralités sur l'usinage des métaux

I.1 Introduction

Dans le cadre des principaux procédés de fabrication mécanique, il est essentiel de citer l'usinage par l’enlèvement des métaux qui a le plus contribué au domaine de fabrication des pièces mécaniques. Les fabricants ont toujours essayé dans les procédés d'usinage actuellement recommandés des stratégies d'optimisation visant à augmenter la productivité, la qualité de surface, ou à réduire les coûts, en recherchant le taux d'enlèvement optimal de plusieurs manières. L’amélioration de la précision d'usinage, la réduction du nombre d’opérations et la recherche d'une plus grande fiabilité en termes de propriétés d'usage des pièces usinées reste un défi important pour les fabricants. Il est important d'utiliser des matériaux de coupe et une géométrie de plaquettes adaptées aux matériaux à usiner pour obtenir un processus d'usinage productif et sans problème. D'autre part, les conditions de coupe, le parcours d'outil et d’autres paramètres doivent également être pris en compte pour obtenir un usinage productif.

I.2 Matériaux de coupe

Les procédés d'usinage sont un procédé de fabrication très efficace pour l’obtention des pièces avec une grande précision et une rugosité de surface appropriée **[1]**. Le choix de la qualité des matériaux à outil est l'un des problèmes les plus importants à résoudre. L'amélioration de la performance des procédés de coupe peut être obtenue par l'utilisation des outils modernes à hautes performances technologiques tels que les céramiques et le CBN. Aussi, les géométries plus complexes ainsi que les caractéristiques mécaniques des produits présentent de nouvelles situations de production difficiles pour les processus d'usinage avec les outils de coupe **[2]**.

Généralement, le problème rencontré par les outils de coupe est la courte durée de vie, par conséquent, le coût d'usinage augmente d’une manière drastique qui est due à l’amélioration des propriétés mécaniques, en particulier la dureté des matériaux a usiné **[3-6]**. Toutes les méthodes traditionnelles ou conventionnelles des processus d'usinage telles que le perçage, le tournage et le fraisage dépendent des caractéristiques physiques et mécaniques de l'outil de coupe et principalement la dureté qui doit être supérieure à la dureté du matériau à usiner.



Figure I. 1 *Différents matériaux de coupe* **[7]**.

I.2.1 Caractéristiques d'un matériau de coupe

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées comme suit **[7 et 8]** :

- Posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée ;
- Posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture ;
- Être chimiquement inerte vis-à-vis du matériau usiné ;
- Être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution ;
- Offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

I.2.2 Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure. Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. Les matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces peuvent être classés en plusieurs groupes : les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les carbures métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitrure de Bore Cubique (CBN) et le diamant **[9-11]**.

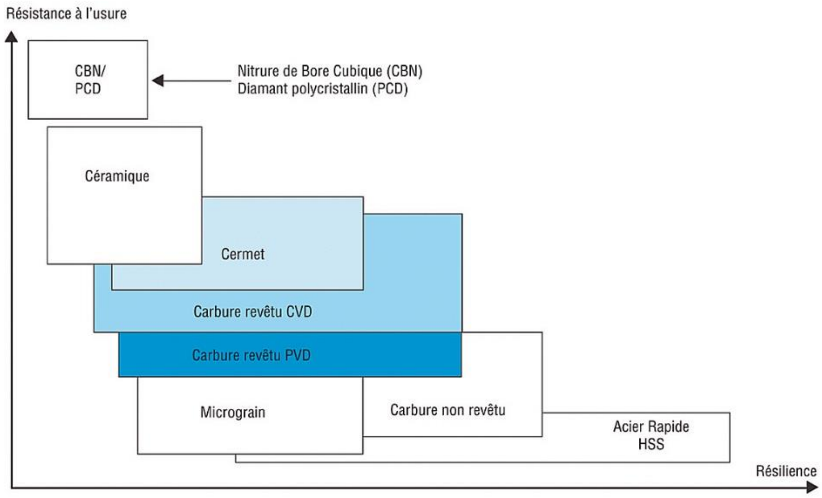


Figure I. 2 *Classification des matériaux de coupe* **[8]**.

I.3 Nitrure de Bore Cubique (CBN)

En 1969, General Electric a mis sur le marché le nitrure de bore cubique - CBN en abrégé - sous le nom de marque « BORAZON ». Il s'est avéré être un développement révolutionnaire dans le domaine des matériaux abrasifs super-durs. Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques. Il atteint une dureté propre d'environ 4700 N/mm^2 selon Knoop, ce qui signifie qu'il est plus dur que la demi-valeur de la dureté du diamant (7000 N/mm^2) et atteint presque le double de la dureté du carbure de silicium (SiC) située entre 2500 - 2700 N/mm^2. Au CBN monocristallin des débuts, qui avait tendance à se diviser en blocs, s'est ajoutée quelques années plus tard une version microcristalline aux caractéristiques particulièrement différentes pour produire des éclats qui s'avèrent beaucoup plus fins. Il est obtenu à partir de deux processus synthétiques ajoutant des particules de nitrure de bore cubique et un matériau liant céramique **[12]**.

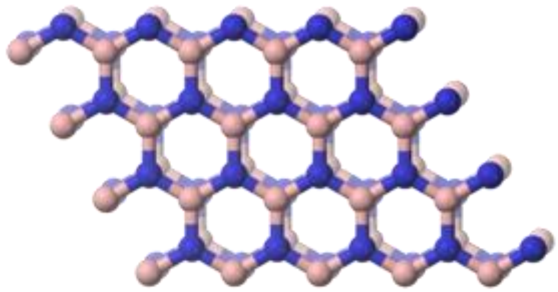


Figure I. 3 *Structure cristalline du nitrure de bore* **[12]**.

I.3.1 Propriétés de nitrure de bore cubique

Le nitrure de bore cubique est un matériau de synthèse dont les propriétés sont voisines de celles du graphite, contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. Sous l'effet de températures très élevées (supérieures à 1500°C) et des pressions importantes comprises (entre 50 et 100 bars), le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique), qui lui confère une grande dureté **[7]**.

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **Nitrure de bore à structure cubique (CBN)** qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- **Nitrure de bore à structure hexagonale (h-BN)** de faible dureté (même structure que le graphite).

Le CBN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable jusqu'à 1400°C. Le CBN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tels que les aciers à outils, les fontes trempées, les superalliages à base de nickel ou de cobalt. Ils permettent aussi l'usinage de matériaux conventionnels (fontes ordinaires par exemple) à des vitesses de coupe élevées aussi bien en tournage qu'en fraisage. Le CBN est commercialisé sous plusieurs formes : directement en plaquette massive, en plaquette carbure revêtue de CBN, en plaquette carbure avec insert brasé et en plaquette carbure avec insert directement fritté avec la plaquette. Cela permet de trouver, en fonction de l'application, le meilleur compromis technico-économique **[7]**.

L'usinage au CBN permet de travailler sans liquide de coupe, la chaleur engendrée à l'interface pièce-outil passant dans le copeau. Les performances observées des CBN sont supérieures à celles des céramiques. Le choix d'utiliser un outil CBN dépendra du contexte économique de l'usinage, l'outil CBN étant encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique.

Le tableau I.1 [13] permet de comparer les principales propriétés du CBN à celles du diamant, ainsi qu'à celles du h-BN.

Tableau. I 1 *Principales propriétés du BN et du diamant* [13]

Propriétés	HBN	cBN	Diamant
Structurales			
Structure	P63/mmc	Cubique F43m	Cubique Fd3m
Paramètre de maille (A)	a 2,504 b 6,661	3,615	3,567
Distance interatomique (A)	a 1,446 b 3,33	1,57	1,54
Densité (g/cm^3)	2,28	3,48	3,52
Mécaniques			
Dureté (Gpa)	10	45	90
Module d'Young (Gpa)	200	758	1050
Thermiques			
Conductivité à 300K ($W.cm^{-1}.K^{-1}$)	a > 2,25 c 0,03	13	20
Expansion à 400°C ($10^{-6}.K^{-1}$)	a –2,9 c 40,5	4,8	3,5
Stabilité à l'oxydation (°C)	> 1000	1200	600
Graphitisation		>1550	1400
Optiques			
Indice de réfraction à 589,3 nm	a 1,65 c 2,13	2,097 – 2,117	2,417
Energie de bande interdite (eV)	3,2 – 5,8 direct	6 – 6,4 indirect	5,47 indirect
Electriques			
Resistivité (Ω cm)	a 10^{10} c 10^{12}	10^{16}	10^{13}

I.4 Revêtements des outils de coupe

Le revêtement des outils de coupe est un procédé très fréquent dans l'usinage, notamment dans l'usinage à grande vitesse (UGV) et l'usinage des pièces de grande dureté. Il apporte des performances accrues aux outils pour résister aux problèmes résultant de l'usinage, comme la température, l'usure prématurée des outils de coupe et aussi aux problèmes de diffusion.

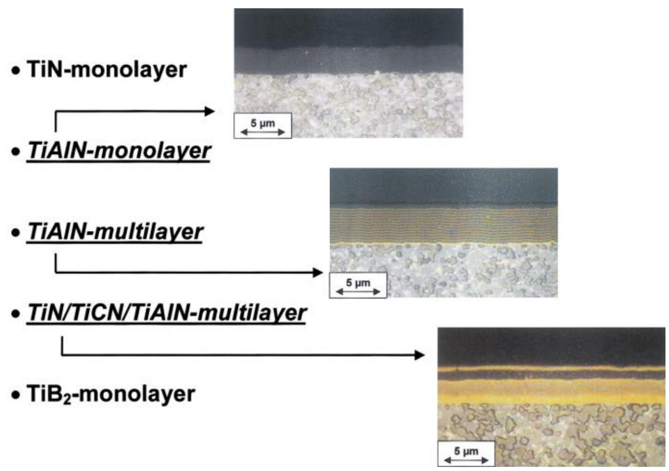


Figure I. 4 *Revêtements de l'outil de coupe* **[14]**.

Le choix du revêtement doit respecter les points suivants **[15]** :

- **La résistance aux températures** : Lors de l'usinage, la chaleur qui se produit est le résultat entre les frottements sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil avec la pièce usinée et les copeaux. Pour ces raisons le revêtement doit constituer un barrage thermique afin de réduire la propagation de la chaleur dans le substrat (matière de l'outil sous le revêtement), sous peine de voir se déformer l'outil et son revêtement.
- **La dureté** : Capacité de résistance d'un revêtement à la déformation, c'est-à-dire à l'usure. Elle est mesurable grâce à la dureté Rockwell C (HRC). Cela permet la comparaison entre les divers revêtements. Ainsi le TiN possède généralement une dureté de 80 HRC. La dureté indiquée est celle de l'outil à température ambiante. Elle diminue en cas d'augmentation de la température, comme lors de l'usinage.
- **Le coefficient de friction** : Il résulte notamment du frottement de l'outil avec la matière. Quand ce coefficient est modéré, la chaleur est basse et l'évacuation des copeaux est aisée, ce

qui évite le problème d'adhérence. Utile lors d'un travail sur de l'aluminium ou du cuivre, pour éviter que leurs copeaux ne collent à l'outil. La qualité de finition (aspérités…) de la surface du revêtement et à fortiori de son substrat, joue un rôle dans la baisse de ce coefficient.

- **La réactivité chimique :** La pression et la température peuvent entraîner un phénomène de diffusion. C'est une réaction chimique provoquant un transfert de matière qui tend à égaliser le potentiel chimique. En résumé, les atomes d'un matériau seront absorbés par un autre matériau. Ex : il ne faut pas usiner de l'acier carbone avec un outil revêtu de diamant. Ce dernier est chargé à 100% d'atome de carbone, contrairement à l'acier qui en contient moins. Le phénomène de diffusion provoquera une détérioration du revêtement à cause du transfert des atomes de carbone de l'outil sur les copeaux.

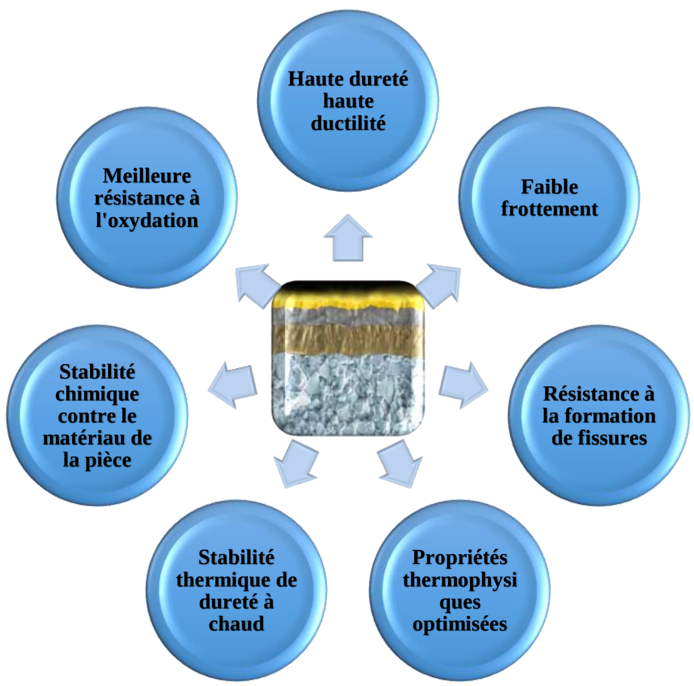


Figure I. 5 *Considération de chois un revêtement.*

I.4.1 Types de revêtements

Généralement, pour un revêtement d'une épaisseur de quelques µm, on distingue principalement 4 types de revêtements possédants chacun des spécificités **[16]**.

- **TIN** : revêtement (en nitrure de titane) caractérisé par une bonne résistance à l'usure à un coût réduit.

- **TICN** : revêtement (en carbonitrure de titane) caractérisé par une grande dureté, recommandé pour l'usinage des matériaux difficiles. L'usure due au frottement de l'outil contre la matière lors de l'usinage (l'abrasion) est limitée.
- **TiAlN**: revêtement (en nitrure de titane aluminium) résistant aux fortes températures, il est destiné à un usinage grande vitesse. Haute performance de coupe et productivité accrue. Il assure une plus grande durée de vie de l'outil.
- **Diamant**: revêtement possédant une dureté très importante. Il assure un état de surface excelle dans les pièces usinées. Revêtement recommandé pour l'usinage des graphites, plastiques renforcés et alliages d'aluminium à fort taux de silicium.

I.4.2 Méthodes de de revêtement

Les revêtements d'un outil de coupe peuvent être élaborés par de nombreuses méthodes. Celles-ci se divisent en deux grandes catégories, les méthodes CVD (Chemical Vapor Deposition) et les méthodes PVD (Physical Vapor deposition).

I.4.2.1 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

CVD signifie dépôt chimique en phase vapeur. Ce type de revêtement est créé par réaction chimique à haute température, 700 à 1050°C. Les revêtements CVD ont une grande résistance à l'usure et une forte adhérence au substrat.

Le premier revêtement de ce type était composé d'une couche unique de carbure de titane (TiC). Les revêtements d'oxyde d'aluminium (Al2O3) et de nitrure de titane (TiN) sont plus récents. Les revêtements CVD de dernière génération incluent le carbonitrure de titane (MT-Ti (C, N) et MT-TiCN, aussi appelés revêtements MT-CVD). Ils ont été développés pour améliorer les propriétés des nuances, notamment grâce à leur capacité à protéger l'interface avec le substrat de la nuance. Les revêtements CVD modernes combinent plusieurs couches MT-Ti (C, N), Al_2O_3 et TiN. Les propriétés des revêtements ont fait l'objet de recherches pour améliorer leur adhérence, leur ténacité et leur résistance à l'usure au moyen d'optimisations de la micro-structure et de post traitements **[16]**.

I.4.2.2 Dépôt physique en phase vapeur PVD

Les revêtements PVD sont obtenus par dépôt physique en phase vapeur à température relativement basse (400 à 600°C). Ce procédé consiste à faire évaporer un métal qui entre alors en réaction avec un gaz, par exemple de l'azote, pour former une couche dure de nitrure sur la surface des plaquettes. Ces revêtements sont très durs et ils améliorent la résistance à l'usure. Leurs contraintes de compression augmentent aussi la ténacité d'arête et la résistance à l'usure en peigne. Les revêtements modernes combinent plusieurs de ces composants sous la forme de couches successives ou de revêtements lamellaires. Les revêtements lamellaires comportent de nombreuses couches fines, de l'ordre du nanomètre, qui constituent un revêtement encore plus dur **[16]**.

I.5 Les fontes

La fonte est un alliage de deux majors éléments (fer-carbone) dont la teneur en carbone est supérieure à 2% (**figure I. 6**) **[17]**. La fonte offre de bonnes propriétés de coulage et d'usinage, ainsi que des propriétés mécaniques modérées. En raison des avantages économiques qu'elle offre, la fonte est utilisée pour de nombreuses applications dans l'industrie automobile et dans la fabrication et la transformation des métaux.

Les fontes sont divisées en plusieurs catégories, fonte grise, fonte blanche et fonte malléable. Les fontes procèdent des propriétés très sévères, comme la dureté élevée et la difficulté d'usinage. Ces principaux avantages sont la bonne résistance à l'usure et l'excellente coulabilité **[18]**.

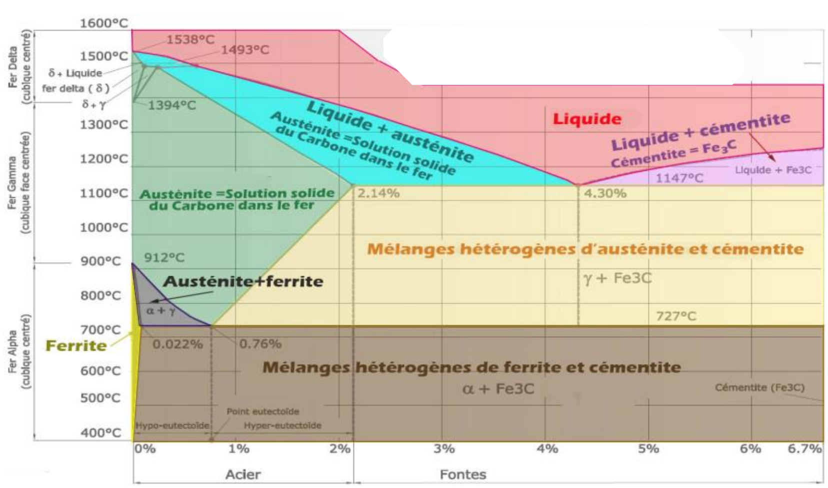


***Figure I. 6** Diagramme fer-carbone* **[19]**.

I.5.1 Types des Fontes

Les fontes sont classées en différentes familles, notamment en fonction du graphite. Le nom de chaque famille reflète la forme du graphite (nodulaire, vermiculaire) ou est lié à l'apparence de la fracture (gris, blanc), ou encore à une propriété mécanique importante (malléable) **[20]**. Les définitions de chaque type de fonte sont les suivantes **[21]** :

I.5.1.1 La fonte grise

La fonte grise est caractérisée par la forme en flocons des molécules de graphite dans le métal (**Figure I. 7**). Lorsque le métal est fracturé, la rupture se produit le long des paillettes de graphite, ce qui lui donne la couleur grise sur la surface du métal fracturé. Le nom de fonte grise vient de cette caractéristique. Il est possible de contrôler la taille et la structure de la matrice des paillettes de graphite pendant la production en ajustant la vitesse de refroidissement et la composition **[22]**. La fonte grise n'est pas aussi ductile que les autres formes de fonte et sa résistance à la traction est également plus faible. Cependant, c'est un meilleur conducteur thermique et un niveau d'amortissement des vibrations plus élevé. Il a une capacité d'amortissement 20 à 25 fois supérieure à celle de l'acier et supérieure à toutes les autres fontes. La fonte grise est également plus facile à usiner que les autres fontes, et ses propriétés de résistance à l'usure en font l'un des produits en fonte les plus volumineux.



Figure I. 7 *Microstructure de la fonte grise* **[23]**.

I.5.1.2 Fonte Blanche

Les fontes blanches présentent un aspect blanc à la cassure. Le carbone qu'elles contiennent est combiné au fer sous forme de carbure (cémentite) (**Figure I.8**). Contrairement aux fontes grises, elles sont obtenues à partir de minerais de fer pauvres en silicium mais riche en manganèse. Les

fontes blanches sont très dures et cassantes et ne se prêtent pas bien au moulage. Elles servent surtout de matière première pour la fabrication de l'acier par décarburation dans des fours spéciaux. Des traitements thermiques de la fonte blanche (chauffage et refroidissement lent) permettent de décomposer le carbure de fer en nodules fins de graphite, ce qui rend la fonte blanche plus apte au façonnage [24].

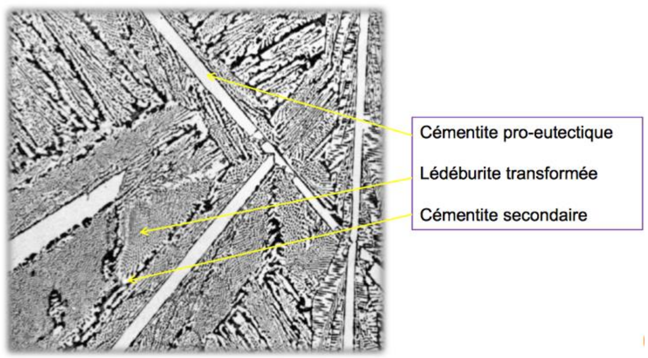


Figure I. 8 *Microstructure de la fonte blanche* **[24]**.

I.5.1.3 Fonte malléable

La famille de la fonte blanche peut être transformée en fonte malléable par un processus de traitement thermique de recuit. Ce traitement thermique permet d'obtenir la dureté, l'allongement à la rupture et les caractéristiques en traction souhaitées. Les fontes malléables présentent une ductilité et une résistance mécanique élevées, un peu comme les aciers non alliés à faible teneur en carbone [24].

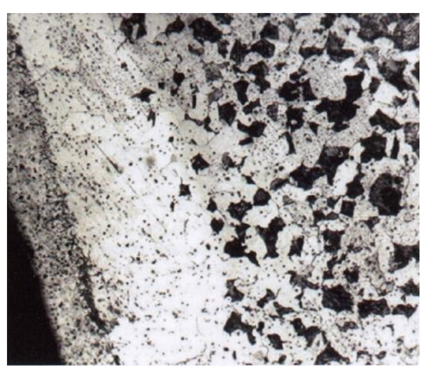


Figure I. 9 *Microstructure de la fonte malléable* **[24]**.

I.5.1.4 Fonte ductile (fonte nodulaire)

La fonte ductile, ou fonte nodulaire, obtient ses propriétés spéciales par l'ajout de magnésium dans l'alliage. La présence de magnésium entraîne la formation du graphite sous forme de sphéroïde par opposition aux flocons de fonte grise. Le contrôle de la composition est très important dans le processus de fabrication. De petites quantités d'impuretés telles que le soufre et l'oxygène réagissent avec le magnésium, affectant la forme des molécules de graphite. Différentes qualités de fonte ductile sont formées en manipulant la structure microcristalline autour du sphéroïde de graphite (**Figure I. 10**). Ceci est réalisé par le processus de coulée, ou par traitement thermique, en tant qu'étape de traitement en aval**.**

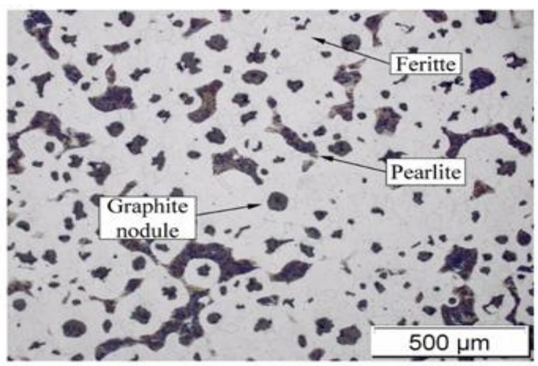


Figure I. 10 *Microstructure de la fonte nodulaire* **[25]**.

I.5.1.5 Fonte graphite compacté

La fonte à graphite compacté a une structure en graphite et des propriétés associées qui est un mélange de fer gris et blanc. La structure microcristalline est formée autour de flocons effilés de graphite qui sont interconnectés. Un alliage, tel que le titane, est utilisé pour supprimer la formation de graphite sphéroïdal. La fonte à graphite compacté présente une résistance à la traction supérieure et une ductilité améliorée comparativement à la fonte grise. La structure et les propriétés microcristallines peuvent être ajustées par traitement thermique ou par l'ajout d'autres alliages **[17]**.

I.5.2 Résumé des compositions de fonte

Un tableau élaboré par Marghitu, D. B. **[26]** présente les différentes gammes de composition pour les différents types de fonte:

Tableau. I 2 *Gamme de compositions pour les fontes non alliées typiques* **[26]**

Valeurs en pourcentage (%)					
Type de Fer	**grise**	**Ductile**	**Graphite compacté**	**Malléable (blanc coulé)**	**blanc**
Carbone	2,5 à 4,0	3,0 à 4,0	2,5 à 4,0	2,0 - 2,9	1,8 - 3,6
Silicium	1,0 à 3,0	1,8 à 2,8	1,0 à 3,0	0,9 - 1,9	0,5 - 1,9
Manganèse	0,2 - 1,0	0,1 à 1,0	0,2 - 1,0	0,15 - 1,2	0,25 - 0,8
Soufre	0,02 - 0,25	0,01 - 0,03	0,01 - 0,03	0,02 - 0,2	0,06 - 0,2
Phosphore	0,02 - 1,0	0,01 - 0,1	0,01 - 0,1	0,02 - 0,2	0,06 - 0,2

I.5.3 Usinabilité des fontes

L'usinabilité est un terme utilisé pour désigner la réponse d'un matériau à l'usinage, en termes de durée de vie de l'outil, de force de coupe, de qualité de la surface usinée, de taux de matière enlevée ou de contrôle des copeaux. L'amélioration de l'usinabilité d'un matériau présente un grand intérêt en raison de son impact significatif sur la compétitivité industrielle. En général, les fontes présentent une bonne usinabilité pour presque tous les critères d'usinage, en particulier par rapport à l'acier **[27]**. La variation de l'usinabilité dans les nuances de fonte dépend de leur composition chimique et de leur microstructure **[28]**.

I.5.3.1 Fonte grise

La structure de base de la fonte grise à graphite lamellaire est similaire à l'acier, ce qui engendre la formation de copeaux cisaillés ou fragmentés pendant l'usinage (généralement copeaux en poussière). Selon Marwanga et al. **[29]**, le graphite agit comme un lubrifiant, réduisant le frottement entre la pièce et l'outil et réduisant le risque de microsoudures; ainsi, l'effet global est d'améliorer la durée de vie de l'outil. La qualité d'état de surface obtenue lors les processus d'usinage dépend du plusieurs paramètres tels que les conditions de coupe ainsi que de la microstructure de la fonte grise **[30]**.

I.5.3.2 Fontes malléables

En raison de la bonne déformabilité plastique des nuances de fonte malléable, des copeaux continus non désirés se forment lors de l'usinage. Le graphite de recuit et le sulfure de manganèse intégré dans la structure de base entraînent toutefois une amélioration du bris de copeaux et donc

des propriétés d'usinage. En raison de sa structure diverse, l'usinabilité de la fonte malléable à cœur blanc suivant l'épaisseur de paroi est plus difficile pour les pièces épaisses en raison du pourcentage élevé de perlite que pour les pièces minces (la couche carbonée atteint en général une épaisseur de 7 mm). C'est la raison pour laquelle la fonte malléable à cœur blanc est essentiellement utilisée pour les pièces minces. Pour la fonte malléable à cœur noir, contrairement à celle à cœur blanc, une structure uniforme en ferrite avec graphite de recuit intégré est présente sur l'ensemble de la section de la pièce en fonte. La fonte malléable à cœur noir est ainsi généralement plus facilement usinable que celle à cœur blanc. Elle est de préférence utilisée pour les pièces épaisses, qui devront être usinées à sec ultérieurement **[31]**.

I.5.3.3 Fontes blanche

Lors de l'usinage de fonte blanche, l'arête de coupe est fortement sollicitée en raison du pourcentage élevé de cémentite dans la structure de la matière. Pour atteindre une durée de vie économique, la vitesse de coupe devrait être réduite et la dureté de la matière augmentée. Une diminution de la profondeur de passe réduit à cet égard la charge sur les tranchants de l'outil. L'utilisation d'outil céramique de coupe permet, comparé aux carbures, de faire passer le facteur de la vitesse de coupe de trois à quatre **[31]**.

I.6 Paramètres de performances d’usinage

I.6.1 Usure de l’outil de coupe

La qualité de la surface et la précision de la pièce usinée sont fonction de la stabilité du système usinant d’une part et liée directement au degré d'usure de l'outil de coupe. L'usure résulte des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre l’outil de coupe, la pièce a usinée et le copeau enlevé, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact. L’usure est un phénomène complexe qui se produit par différents mécanismes sous différentes formes. Les causes d’usure sont les suivantes (**figure I.11**) **[32]** :

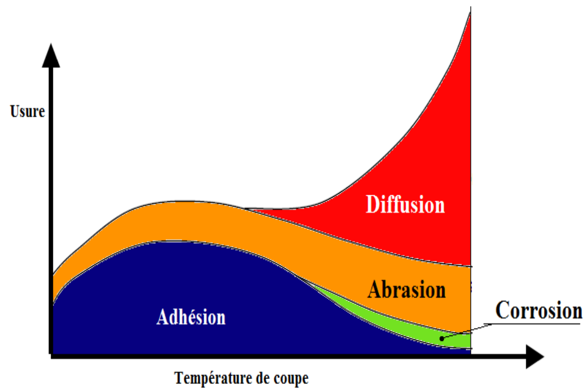


Figure I. 11 *Causes d'usure lors de l'usinage.*

I.6.1.1 Causes d'usure

Le phénomène d'usure des outils coupants est l'un des problèmes majeurs rencontrés lors de l'usinage. Ce phénomène se manifeste de différentes manières selon les causes qui le provoque **[33-34]**.

- **Usure par abrasion:** Se manifeste par l'arrachement de micro copeaux par des particules très dures contenues dans la microstructure de la matière usinée. L'élévation de la température fait accentuer cette usure à cause de la diminution de la dureté de l'outil. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse. L'usure est abrasive quand l'usinage est à sec, mais lorsque l'usinage est effectué avec lubrification, l'usure ainsi est dite érosive.
- **Usure par adhésion :** favorisée par les grandes pressions, des fragments du copeau peuvent adhérer dans l'outil en forme de microsoudure. Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage.
- **Usure par corrosion (oxydation):** C'est une usure qui est due en fait à l'oxydation de la matière de l'outil. Cette oxydation, en réalité n'est rien d'autre qu'une attaque chimique par l'oxygène.
- **Usure par diffusion :** elle est due à la diminution de l'inertie chimique de l'outil provoquée par des températures très élevées. En conséquence, les atomes de l'outil

réagissent chimiquement avec les atomes de la matière usinée, spécialement lorsqu'il y a une affinité chimique entre les deux matières.

I.6.1.2 Différentes formes d'usure des outils

Les formes d'usure des outils de coupe (**figure I.12**) dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil matière, condition d'usinage). On arrange également quatre zones principales d'usure et plus clairement l'outil est soumis aux modes d'usures définis ci-après**.**

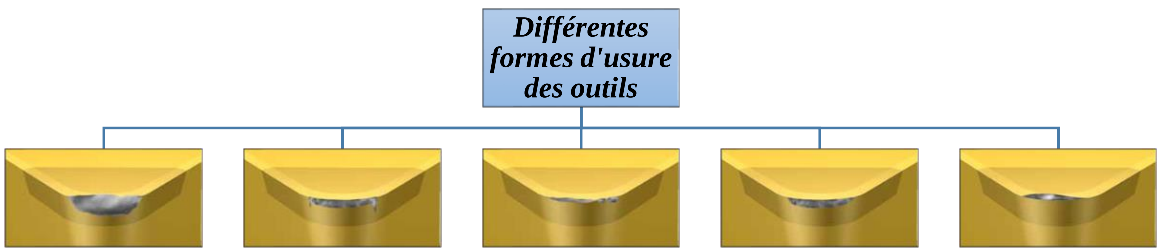


Figure I. 12 *Différentes formes d'usure des outils.*

- **Usure en cratère:** Le frottement du copeau sur la face d'attaque de l'outil cause son usure (**Figure I.13**), soit par la diffusion ou par l'adhésion de ces particules sur le copeau à cause de l'élévation de la température de coupe qui fait diminuer la dureté de vie de l'outil. Cette usure est fréquente surtout dans l'usinage des matériaux à faible conductivité thermique. La forme du cratère est définie par sa profondeur maximale KT.



Figure I. 13 *Usure en cratère* **[35]**.

- **Usure en dépouille:** C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable, étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce (**figure I.14**).



Figure I. 14 *Usure en dépouille* **[35]**.

- **Usure en entaille:** c'est une combinaison de l'usure en cratère et en dépouille au point de l'intersection de l'arrête tranchante principale avec la surface usinée (qui coïncide avec la ligne de la profondeur de passe). Elle est courante dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires (**figure I.15**).

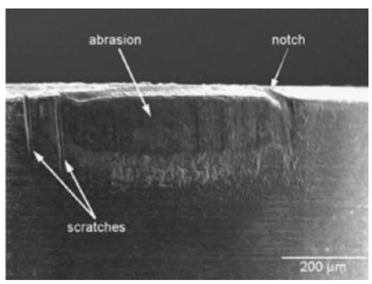


Figure I. 15 *Usure en entaille* **[36].**

- **Usure par déformation plastique:**

Le bec de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des autres pressions régnant dans la zone de coupe. Cette déformation se traduit par un affaiblissement plastique du bec de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille (**figure I.16**).



Figure I. 16 *Usure par déformation plastique* **[37].**

- **Usure par écaillage:**

On rencontre ce type d'usure dans le cas d'usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par les usinages interrompus ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête ou sur la face de coupe suite à l'enlèvement de matière qui se fait par fragmentation aléatoire. L'importance de l'écaillement et de la fissuration thermique est évaluée jusqu'à un certain point par la largeur maximale d'usure en dépouille VBmax. (**Figure I.17**).



Figure I. 17 *Usure par écaillage***[35].**

- **Usure par arête rapportée:** Cette usure est provoquée par la soudure de la matière de la pièce sur la plaquette. Le copeau atteint une température permettant de le rendre "collante" mais, à ce stade, il refroidit suffisamment vite pour adhérer à la plaquette. C'est le type d'usure la plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée (**figure I.17**).



Figure I. 18 *Usure par arête rapportée* **[35]**.

I.6.2 Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand l'avance double) **[38]**.

I.6.2.1 Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe $F_{rés}$, peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (**figure I.18**).

- **Fx ou Fa :** composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **Fy ou Fr :** composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.
- **Fz ou Ft :** composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

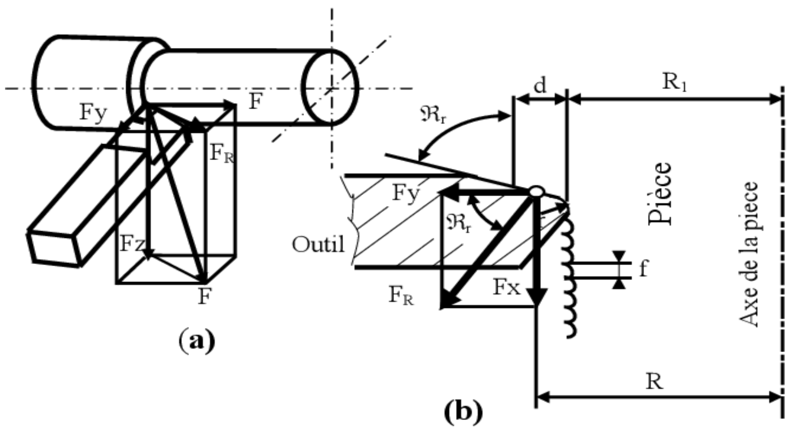


Figure I. 19 Composantes des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la (**figure I.18**), la force de coupe résultante $F_{rés}$, étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression :

$$\boldsymbol{F_{rés}} = \sqrt{Fa^2 + Fr^2 + Ft^2} \qquad \textbf{(I.1)}$$

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

$$\boldsymbol{F_a} = C_1 ap^{x_1}.f^{y_1}.V_C^{n_1}.K_a \qquad \textbf{(I.2)}$$

$$\boldsymbol{F_r} = C_2 ap^{x_2}.f^{y_2}.V_C^{n_2}.K_r \qquad \textbf{(I.3)}$$

$$\boldsymbol{F_t} = C_3 ap^{x_3}.f^{y_3}.V_C^{n_3}.K_t \qquad \textbf{(I.4)}$$

Où les coefficients C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage. Les coefficients Ka, K_r, K_t ce sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage. Les exposants $x_{1,2,3}$, $y_{1,2,3}$, $n_{1,2,3}$, caractérisent le degré d'influence des paramètres *Vc, f* et *Doc* sur les forces de coupes *Fa, Fr, Ft*.

I.6.3 Puissance de coupe

La puissance de coupe est un paramètre machine. La puissance nette peut être calculée pour s'assurer que la machine en question est adaptée à la fraise et à l'opération envisagée. Cette puissance est donnée par la relation:

$$Pc = \frac{Fc \times Vc}{60} \quad \text{(I.5)}$$

Fc : Effort de coupe tangentiel, [N]

Vc : Vitesse de coupe, [m/min]

Aussi : $$Pb = \frac{Pc}{\eta} \quad \text{(I.6)}$$

Pb : Puissance absorbée (puissance motrice), qui est un paramètre machine (W).

η : Rendement : paramètre machine.

Pour que l'usinage soit possible, il faut que la puissance *Pb* soit supérieure à *Pc*.

I.6.4 Qualité de surface

L'aptitude d'une surface à une fonction donnée, dépend d'un ensemble de conditions, notamment des caractéristiques de ses états de surface. Les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico- chimique. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'aux défauts géométriques. Ces derniers sont généralement sous quatre numéros d'ordre (**figure I.20**) **[39-40]**.

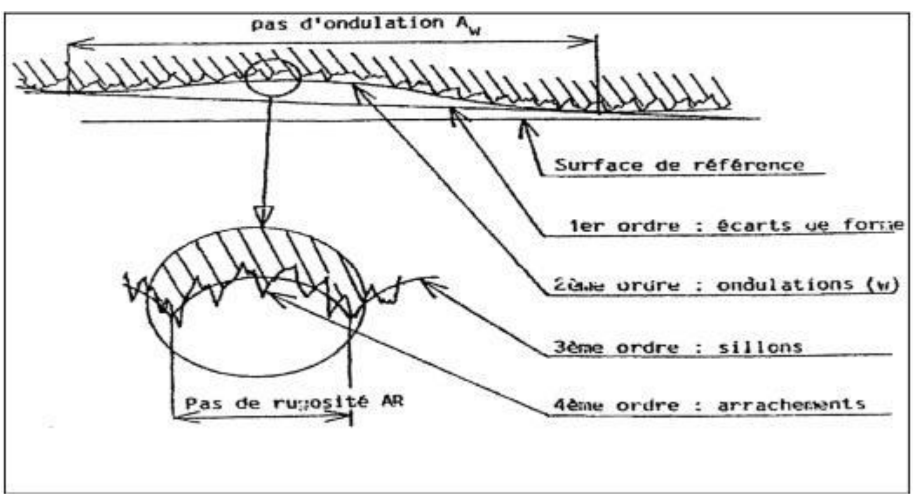


Figure I. 20 *principaux défauts de surface***[41]**.

I.6.4.1 Principaux défauts de surface

- **Défauts du premier ordre :** Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (*rectitude, cylindricité, etc.*) et de position (*perpendicularité, parallélisme, etc.*). Provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil (**Figure I.20**).
- **Défauts du deuxième ordre :** Défauts plus petits. Ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tour au tournage ou de l'avance par dent en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil de coupe (**Figure I.20**).
- **Défauts du troisième ordre :** Ce sont des stries ou des sillons laissés par l'outil de coupe. Ils sont fonction de l'avance par dent de la fraise, ou à des vibrations haute fréquence (**figure I.20**).
- **Défauts du quatrième ordre :** Ils sont constitués par des arrachements, fente et piqûre, … etc. Ils sont dus à des marques d'outil ou à des vibrations de hautes fréquences. Ce type de défaut a un caractère apériodique. L'ensemble des défauts de 3ème et 4ème ordre constituent la rugosité de la surface (**figure I.20**).

I.6.4.2 Paramètres caractéristiques d'état de surface

Les normes et les paramètres désignant la rugosité de surface sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de surface fréquemment utilisées dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme **ISO 4287** (**figure I.21**).

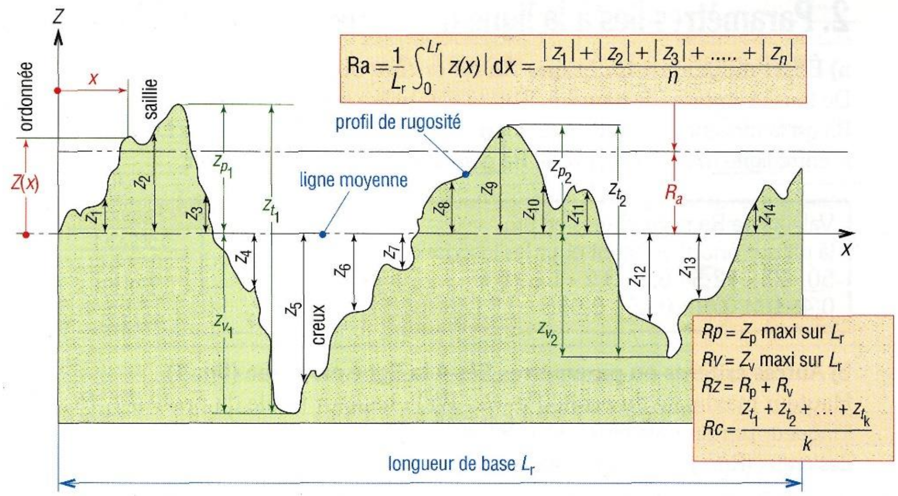


Figure I. 21 *Paramètres d'état de surface* **[42].**

- **Rugosité moyenne arithmétique R_a:** Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m (**figure I.20**).

$$R_a = \frac{1}{l_m}\int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)|\, dx \qquad (I.7)$$

- **Rugosité moyenne profondeurs R_z :** Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives l_e (**figure I.20**).

$$R_z = \frac{1}{5}(R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \qquad (I.8)$$

Hauteur maximale des pics R_p : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m (**figure I.20**).

$$R_p = R_{p3} \qquad (I.9)$$

- **Profondeur maximale des vallées R_v :** Profondeur maximale du profil de rugosité R en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m (**figure I.20**).
- **Rugosité maximale R_t :** Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R, sur la longueur totale d'évaluation l_m (**figure I.20).**

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \qquad (I.10)$$

I.6.4.3 Paramètres influençant la qualité de surface

La réalisation d’un usinage de qualité varie selon l’opération à effectuer. Nombreux sont les paramètres qui influencent la qualité de surface de la pièce finale comme l’illustre le diagramme de la **figure I.22**. Ce dernier englobe tous les facteurs de coupe, humains et matériels, susceptibles d’agir sur l’intégrité de surface de la pièce usinée [43].

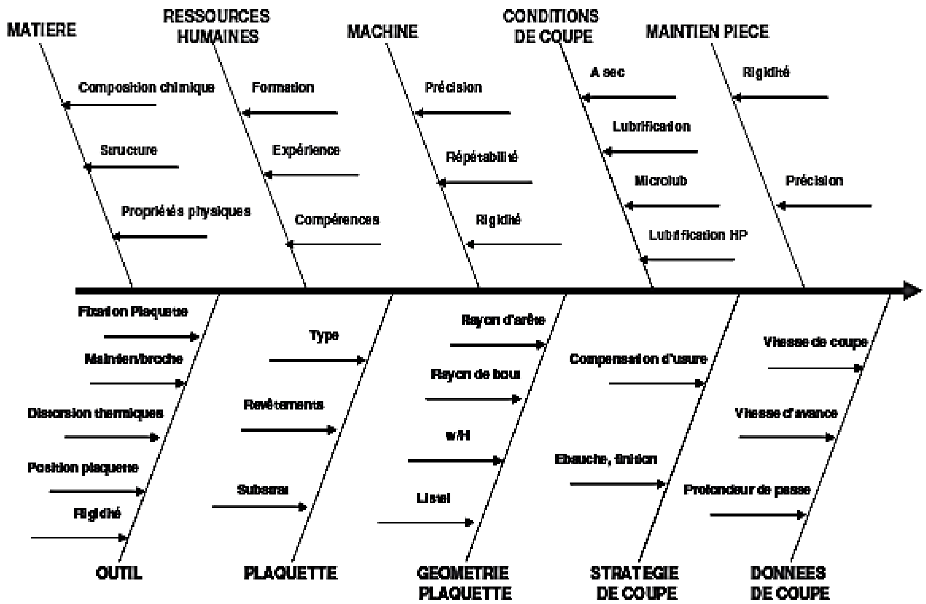


Figure I. 22 *Paramètres de coupes influençant l’intégrité de surface en usinage, sous la forme d’un diagramme d’Ishikawa* [43].

I.6.5 Evolution de la température dans l’usinage

La température est parmi les phénomène qui a une influence majeure sur les procédés de mise en forme par enlèvement de matière. Elle est généralement générée par le frottement et la déformation plastique au niveau de l'interface de contacte outil-pièce. Sous certains paramètres de coupe, l’augmentation de température dans le contact peut fortement accélérer l'usure de l’outil de coupe et par conséquent, diminuer sa durée de vie (Tenue) [44].

Tous les phénomènes physiques qui sont à la base de l’usure des outils de coupe (frottement, abrasion, corrosion chimique, usure par diffusion) sont étroitement sous la dépendance de la température.

Les causes de l’augmentation de la chaleur dans la zone de coupe pendant l’usinage des matériaux métalliques sont:

a. Augmentation de la vitesse de coupe.
b. Augmentation de la section de coupe.
c. Augmentation des propriétés mécaniques du matériau usiné.

La température générée dépend aussi des conditions de refroidissement effectuées :

a. La conductivité thermique du couple outil-pièce; plus la conductivité est élevée, plus la chaleur sera dissipée facilement.
b. Les propriétés thermiques des revêtements d'outil qui permettent d'obtenir une bonne évacuation de la chaleur.
c. Les lubrifications utilisées.

Pendant l'usinage, ou l'outil en train d'arracher une matière, on distingue quatre zones (**figure I.23**) **[44]** :

• **Zone de cisaillement primaire (ZI)** : zone de déformation et de cisaillement. Une élévation de température se produit dans la masse du copeau et peut être transféré à l'outil et à la pièce.

• **Zone de cisaillement secondaire (ZII)** : zone de frottement copeau-outil (face d'attaque) : génération de chaleur.

• **Zone de cisaillement tertiaire (ZIII)** : zone de frottement outil-pièce (face en dépouille) : génération de chaleur.

• **Zone de forte pression hydrostatique** : bec de l'outil (arête rapportée ou zone morte : stable ou instable)

Les zones 1 et 2 sont les sièges de frottements intenses. Ces frottements provoquent une élévation considérable de température dans les zones de contact, formation de plasma à l'interface des deux corps.

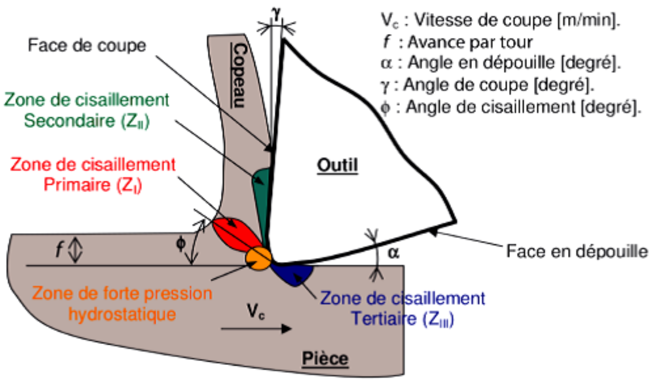


Figure I. 23 *Schéma des zones de dégagement de chaleur* **[45]**.

D’autre part, Battaglia et al. **[46]** ont défini un schéma qui résume en première approximation la génération de la chaleur par frottement à l’interface de contact outil-copeau et outil-pièce et par déformation plastique dans les trois zones principales de cisaillement, ainsi que leur répartition dans les différentes parties du système outil-pièce-copeau, tel qu’indiqué sur la **figure I.24**. Une grande partie de la chaleur produite dans la zone de coupe est évacuée par le copeau (environ 80%), le reste est dissipé dans l’outil et dans la pièce usinée, ainsi qu’une fraction minimale évacuée par l’air, difficilement estimable.

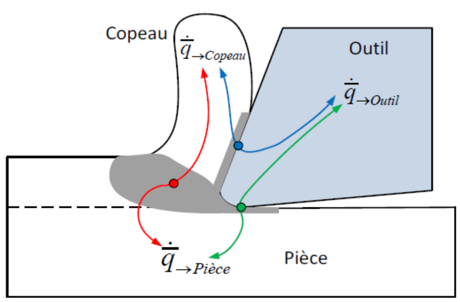


Figure I. 24 *Répartition des flux thermiques dans la zone de coupe* **[46].**

Plusieurs méthodes sont envisageables pour la mesure des températures dans un processus de coupe selon la nature des informations souhaitées. Parmi celle–ci, on peut citer les principales méthodes suivantes **[44]**:

a) Mesure par thermocouples implantés dans la plaquette de coupe.

b) Mesure directe de la température par thermocouples directs du couple outil- pièce.

c) Mesure des températures par un pyromètre infrarouge solidaire de l'outil de coupe, focalisé sur l'arête de coupe. Ce procédé de mesure a été retenu pour notre étude.

d) Mesure par caméra thermique CCD. L'avantage principal de ce type de mesure est lié à l'obtention directe de la cartographie des températures.

e) Mesure par analyse métallurgique de la plaquette de coupe après usinage

Les quatre premiers points correspondent à des méthodes de mesure de la température en temps réel. La dernière est une méthode de mesure à posteriori.

I.7 Travaux de recherche (état de l'art)

Plusieurs chercheurs ont étudié les performances des outils de coupe en céramique et CBN lors de l'usinage des différentes nuances de fonte. D'autre part, plusieurs études ont adopté l'utilisation de la planification expérimentale dans le but de modéliser et d'optimiser les paramètres technologiques.

Bonifacio et Diniz **[47]** ont réalisé une étude sur le tournage de la fonte grise avec des outils en céramique à différentes vitesses de coupe. La **figure I.25** montre les résultats des tests de durée de vie de l'outil, en considérant l'usure moyenne du dépouille VB_B sur des outils céramiques mixtes $Si_3N_4+Al_2O_3/TiN$ en utilisant trois vitesses de coupe différentes de 100, 160 et 240 m/min. Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant une vitesse de coupe de 160 m/min. L'utilisation de la vitesse de coupe la plus faible a favorisé l'écaillage et la vitesse la plus élevée a accéléré l'usure de l'outil.

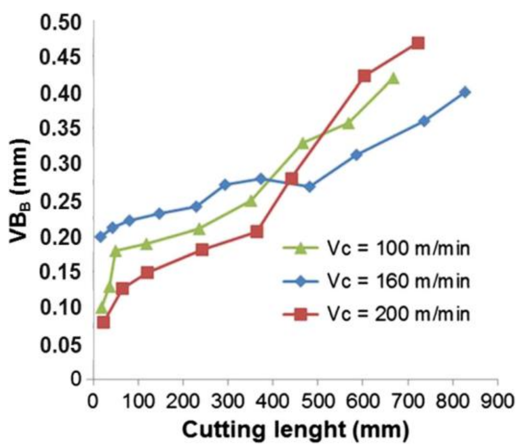


Figure I. 25 *Usure de céramique $Si_3N_4+Al_2O_3/TiN$ lors le tournage de la fonte grise* **[47]**.

M.Gastel et al. **[48]** ont réalisés une investigation sur le mécanisme d'usure des outils en nitrure de bore cubique (CBN) utilisés pour l'usinage de la fonte graphite compactée (CGI) et la fonte grise (CI) **(Figure I.26)**. Deux effets principaux ont été trouvés qui sont responsables de l'usure de l'outil,

à savoir: (1) l'oxydation de l'outil, et (2) l'inter-diffusion des éléments constitutifs entre l'outil et CGI. Ces mécanismes d'usure sont plus ou moins les mêmes pour l'usinage du CGI et du CI gris. La différence de durée de vie de l'outil peut s'expliquer par la formation d'une couche de MnS sur la surface de l'outil dans le cas du CI gris. Cette couche est absente dans le cas de CGI.

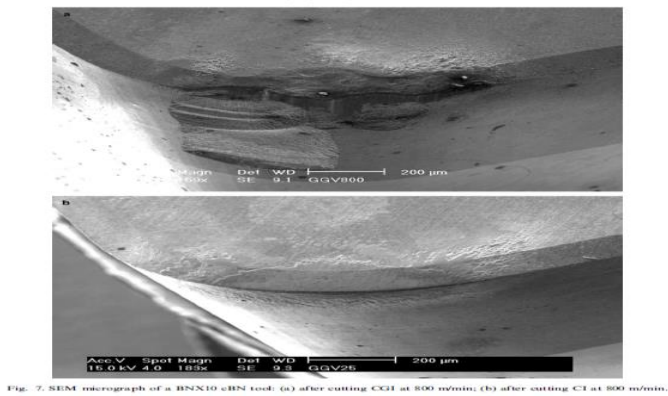


***Figure I. 26** Micrographie SEM d'un outil CBN (BNX10).*

Antonio Maria de Souza Jr. et al. **[49]** ont comparé les performances de deux fraises à surfacer pour le fraisage à grande vitesse de la fonte grise. La fraise « A », comprend 24 inserts en céramique Si_3N_4, est la deuxième fraise « B », avec des inserts mixtes, 20 inserts en Si_3N_4 intercalées par quatre inserts PCBN. La vitesse de coupe (*Vc*), la profondeur de coupe (*Doc*) et l'avance par dent (*fz*) ont été maintenues constantes. La rugosité de surface (*Ra* et *Rt*) et la durée de vie de l'outil (basée sur l'usure du flanc, VB_Bmax) et d'autres paramètres ont été pris en compte pour comparer les deux systèmes. Le système "B" a présenté de meilleures performances selon tous les paramètres.

S. Thamizhmanii et S. Hasan **[50]** ont analysé l'évolution de l'usure des outils, la rugosité des surfaces et les efforts de coupe lors du tournage de la fonte grise coulée par un outil CBN. Les divers tests ont révélé une rugosité (*Ra*) minimale lorsque la vitesse de coupe (*Vc*) sont plus élevées et que l'arête rapportée (built- up- edge) n'a pas été observée aux vitesses basses.

Pereira, A. A. et al. **[51]** ont présenté une étude sur l'influence du pourcentage de soufre (0.065, 0.12, 0.15 et 0.18) % sur l'usinabilité de la fonte grise (FC25) en tournage à des vitesses de coupe de 100, 150 et 200 m/min. Ils ont affirmé que l'usinage de la fonte (FC25) avec (0.12, 0.15 et 0.18) % de soufre à (150 et 200) m/min, ne se diffère pas significativement. Avec l'inclusion de 0,065% S, la tenue du carbure non revêtu a présenté une réduction de (24, 32 et 38) %, pour les vitesses (100, 150 et 200) m/min, respectivement, comparativement à la fonte grise FC25 à 0,12% de soufre.

Camusçu **[52]** a effectué une investigation expérimentale lors l'usinage de fonte nodulaire (HB 256) en utilisant différents outils en céramique à différentes vitesses de coupe (**figure I.27**). L'outil en céramique d'alumine revêtu de TiN a montré la meilleure performance. Selon l'auteur, ce résultat confirme que la dureté élevée du revêtement TiN (3000 kgf/mm^2) a fortement amélioré la résistance des outils en céramique pendant l'usinage de la fonte nodulaire.

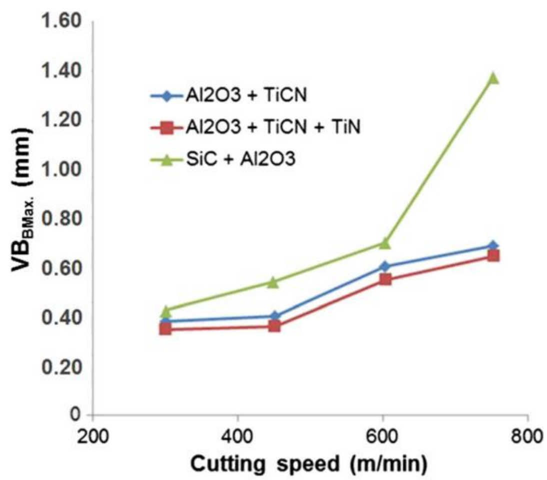
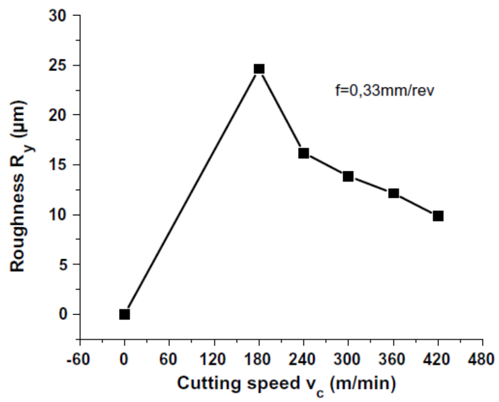


Figure I. 27 *Usure en dépouille de l'outil en fonction de la vitesse de coupe lors du tournage de la fonte nodulaire (246 HB) avec des outils en céramique* **[52]**.

Souza, J. V. C. et al. **[53]** ont évalué les performances de l'outil en céramique Si_3N_4 en termes de l'usure, rugosité de surface, température de coupe et effort de coupe généré lors du tournage de la fonte grise. Les résultats ont révélé que l'outil convient bien à l'usinage de la fonte grise, après 7500 m d'usinage il n'a pas atteint la valeur admissible de l'usure [*VB*] =0.3mm (**figure I. 29**). Aussi l'augmentation de (*Vc*) de (180 à 420) m/min conduit à une diminution de la rugosité (*Ra*) de (4 à 2) µm (**figure I. 28**). Il a été constaté aussi que l'effort tangentiel est le plus élevé et qu'après la vitesse de 300 m/min, les efforts de coupe ont tendance à diminuer (**figure I. 28**).



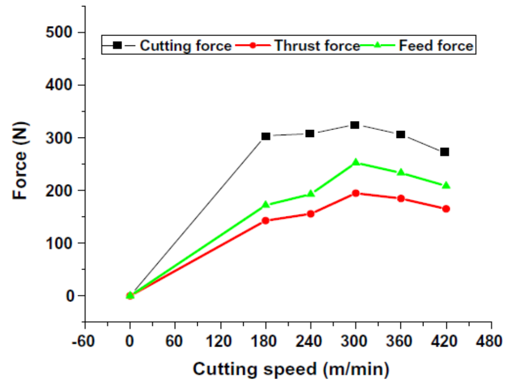


Figure I. 28 *Rugosité de surface et effort de coupe vs vitesse de coupe à f=0.33mm/tr, ap=1.0mm* **[53]**.

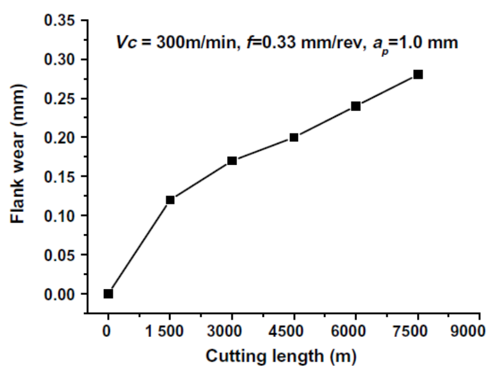


Figure I. 29 *usure en dépouille vs longueur de coupe vc=300 m/min*

à f=0.33mm/tr, ap=1.0mm **[53]**.

Emre Yucel and Mustafa Gunay **[54]**, ont utilisé un plan de Taguichi (L_{18}) et aussi l'approche (RSM) pour modéliser les paramètres de sortie (*Ra* et *Fz*) lors le tournage de la fonte blanche par deux outils en CBN et céramique. Les résultats trouvés montrent que l'avance (*f*) est le paramètre principal influençant la rugosité de surface (*Ra*) et que la profondeur de passe (*Doc*) est le facteur le plus prépondérant sur l'effort de coupe, et que l'outil CBN exhibe des rugosités moindres par rapport à la céramique. Ils ont aussi proposé des modèles linéaires de (*Ra* et *Fz*) qui tiennent compte des conditions de coupe et du matériau de l'outil **(Figure I.30)**.

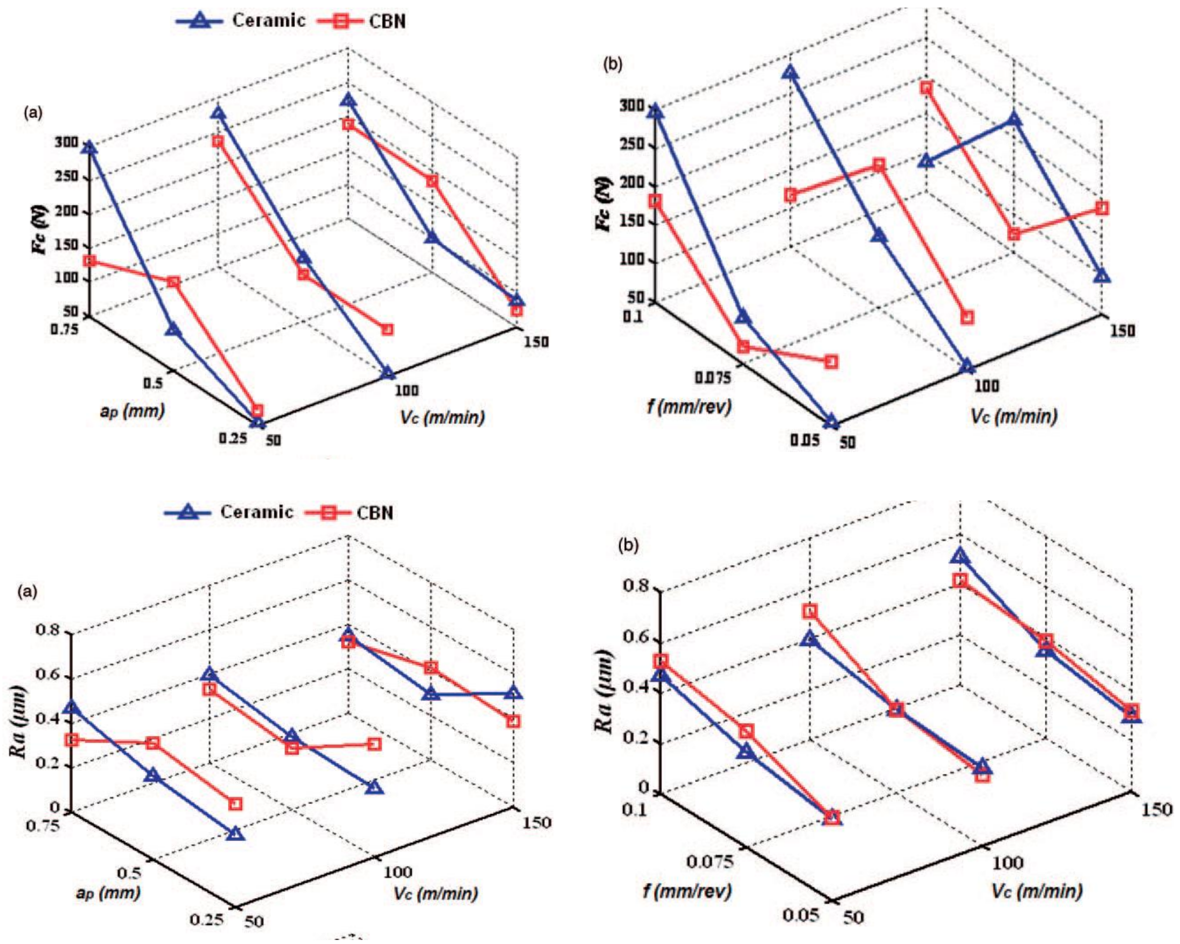


***Figure I. 30** évolution de l'effort de coupe et rugosité de surface en fonction de paramètres de coupe (Vc, f et ap)* **[54]**.

P. Kulkarni et al. **[55]** ont évalué l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors l'usinage de la fonte grise par des outils en carbure. Ils ont constaté que la rugosité est largement influencée par l'avance et le rayon de bec de l'outil.

Fiorini, P. and Byrne, G. **[56]** ont étudié la formation de l'arête rapportée (built-up layer) (BUL) sur les plaquettes en CBN lors de l'usinage à grande vitesse de la fonte grise GG25. Ils ont indiqué que l'usinage à grande vitesse *Vc* = 750 m/min est la clé de la protection de l'outil CBN contre la formation de (BUL), la température de coupe maximale est essentielle pour empêcher les modes d'usure entraînés thermiquement, tels que l'usure du cratère, trouvés à des vitesses de coupe faibles (*Vc* = 250 m / min) **(Figure I.31)**.

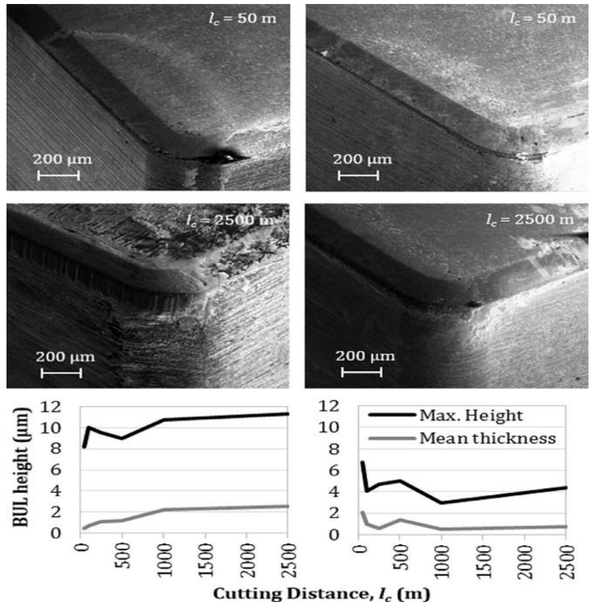


Figure I. 31 *Images SEM (BEI) et données BUL des outils pcBN après des intervalles d'usinage à vc = 250 m / min (à gauche) et vc = 750 m / min (à droite)* **[56]**.

Chen, J. et al **[57]** ont proposé des modèles de Taylor pour prédire la durée de vie de deux outils en carbure cémenté (WTVC8 et WC8) en fonction des conditions de coupe lors de l'usinage de fonte grise HT250. L'analyse des modèles a montré que la durée de vie est largement influencée par la vitesse de coupe, suivie par la profondeur de passe et en dernier lieu par l'avance par tour. Aussi l'observation des surfaces usées a indiqué que les principaux mécanismes d'usure présents sont l'adhérence et l'oxydation et il n'y a pas d'usure par abrasion apparente pour les deux outils (WTVC8 et WC8).

Ghani JA et al. **[58]** ont mené une investigation expérimentale sur l'impact de l'usinage vert (à sec) et lubrifié (l'huile commerciale+ l'huile de palme) sur la tenue de l'outil et le fini de surface durant l'usinage de la fonte ductile FCD700. Les auteurs ont signalé que l'usinage humide et plus performant, en termes de durée de vie de l'outil que l'usinage à sec, mais la rugosité de surface pour tous les usinages à sec et lubrifiés était presque similaire pour les conditions de coupe utilisées **(Figure I. 32)**.

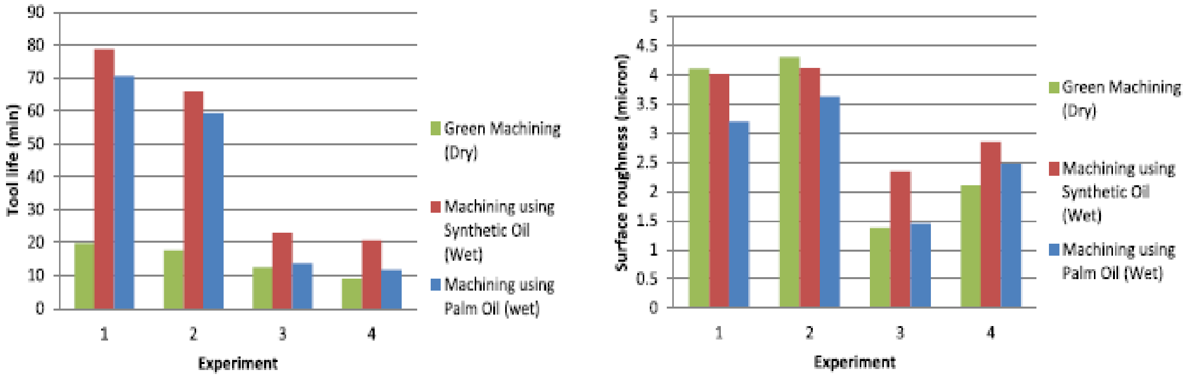


***Figure I. 32** Comparaison de durée de vie et rugosité de surface sous les trois conditions de coupe* **[58]**.

Bin li **[59]** a réalisé une étude basée sur une plan d'expérience orthogonale L_9 lors l'usinage à sec de la fonte grise par un outil de coupe en carbure cémenté revêtu. Une analyse de régression a été effectuée pour les données expérimentales par la méthode des moindres carrés. L'équation empirique entre les paramètres de coupe et la force de coupe a été établie. La modalité et le mécanisme d'abrasion de l'outil ont été étudiés. L'étude a fourni une base fondamentale pour l'optimisation des paramètres technologiques de coupe **(Figure I. 33)**.

A) B)

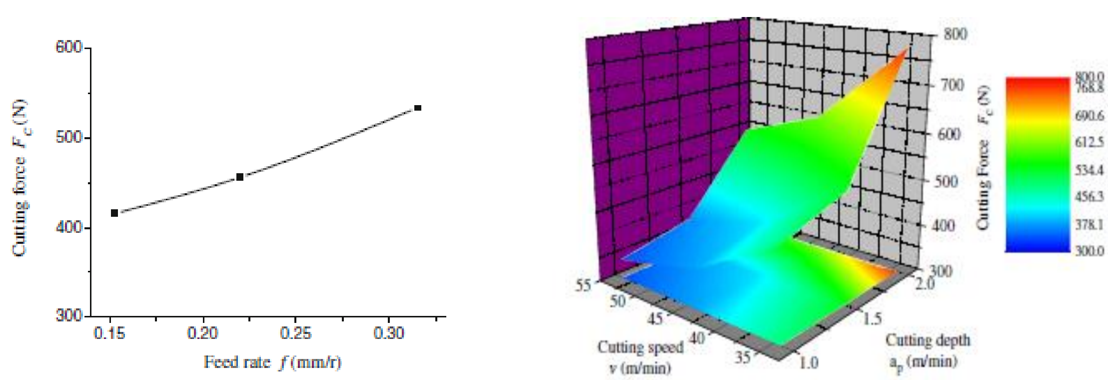
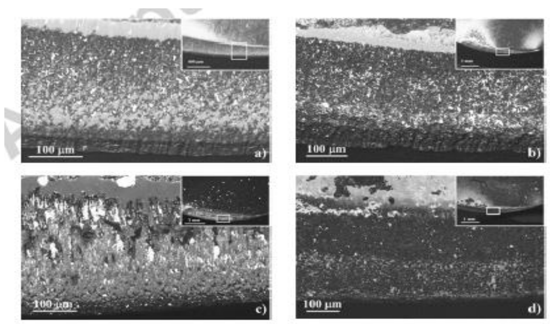


***Figure I. 33** a) évolution de l'avance sur l'effort de coupe b) Surface de changement de la vitesse et de la profondeur sur la force de coupe* **[59]**.

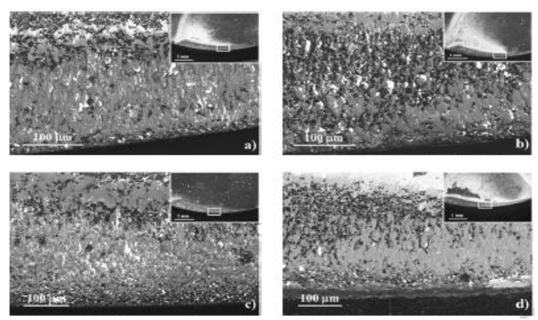
L'objectif de l'étude de Oleksandr G et al. **[60]** est de caractériser le processus d'usinage de deux types de fonte blanche à haute teneur en chrome dans des conditions brutes et trempées avec deux grades d'outils pcBN en termes de spécificités de l'usure de l'outil et de la dynamique du processus d'usinage. L'étude vise à examiner la relation entre les caractéristiques dynamiques de l'usinage de

la fonte blanche à haute teneur en chrome avec des outils pcBN et les processus de coupe et d'usure des outils. L'usinage de la fonte blanche à haute teneur en chrome brut de fonderie se caractérise par une faible usure des outils et une faible sensibilité des forces de coupe aux vitesses de coupe et à la composition des matériaux de la pièce. L'usinage de fonte blanche à haute teneur en chrome trempés avec bcBN se caractérise par une usure de l'outil et des efforts de coupe plus importants (jusqu'à 30 % de plus). Pour les outils hcBN, ce comportement ne se produit que pour la fonte blanche à haute teneur en chrome à haute teneur en Si.

Les mécanismes d'usure des outils bcBN sont caractérisés par la formation de cratères plus proches de l'arête de coupe mineure, ainsi que par l'usure des flancs et l'arrondissement de l'arête de coupe. Les outils hcBN sont principalement caractérisés par un arrondissement important de l'arête. Un arrondi d'arête allant jusqu'à 216 µm a été observé lors de l'usinage de fonte blanche à haute teneur en chrome trempé du groupe 2 à des vitesses de 140-160 m/min **(Figure I.34)**.



SEM images of bcBN worn tools a) Group 1 HCCI, as-cast, v_c = 160 m/min; b) hardened, v_c = 140 m/min; c) Group 2 HCCI, as-cast, v_c = 120 m/min; d) hardened, v_c = 160 m/min



SEM images of hcBN worn tools a) Group 1 HCCI, as-cast, v_c = 160 m/min; b) hardened, v_c = 140 m/min; c) Group 2 HCCI, as-cast, v_c = 120 m/min; d) hardened, v_c = 160 m/min

Figure I. 34 *Mécanisme d'usure de l'outil cBN* **[60]**.

TA Sousa et al. **[61]** ont utilisés l'outil de coupe en céramique d'alumine renforcé à l'oxyde de magnésium, développé à l'échelle expérimentale pour l'usinage à sec de la fonte vermiculaire de classe 450. Pour les essais d'usinage, les conditions suivantes ont été utilisées : La vitesse de coupe (*Vc*) Varie de 200 et 500 m/min ; l'avance (*f*) varie de 0.1 et 0.3 mm/tr et la profondeur de passe (*doc*) varie de 0.5 et 1.0 mm. Pour le processus d'usinage, un centre d'usinage CNC a été utilisé pour évaluer les variables ; usure en dépouille, rugosité *Ra* et *Rt*. Ce travail a obtenu les meilleurs résultats en utilisant les conditions : *Vc* de 200 m/min, *f* =0.1 mm, *doc*=1.0 mm, afin d'aboutir à des valeurs minimales de l'usure et de la rugosité.

Ali Kalyon et al. **[62]** ont appliqué la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA) basée sur la méthode Taguchi pour l'optimisation des paramètres d'usinage (l'effort de coupe résultante (F_R) et la rugosité de surface (R_a)) lors du tournage dur de la fonte à haute teneur en chrome. Les résultats de l'ANOVA basés sur l'indicateur (GRG) ont indiqué que l'avance, suivie de la profondeur de passe, étaient les facteurs principaux qui ont affecté les réponses. Des niveaux optimaux de paramètres de coupe ont été trouvés sur la base des résultats d'optimisation multi-réponse obtenus en considérant le rapport signal / bruit (S/N) maximal de GRG, (Vc=100 m/min, f=0,05 mm/tr et ap=0,1 mm)

Meddour I et al. **[63]** ont obtenues les modèles de prédiction de la rugosité de surface et des forces de coupe à l'aide de RSM, ANN et une optimisation des conditions de coupe en utilisant l'approche NSGA-II, durant le tournage de finition de l'acier trempé AISI 4140 avec un outil en céramique mixte. Les résultats ont montré que l'usinage avec un rayon d'outil plus grand et une avance plus faible produit des surfaces avec de meilleures caractéristiques fonctionnelles et que l'effet indésirable de l'avance peut être réduit en augmentant la vitesse de coupe. L'approche de la fonction de désirabilité (DF) et l'algorithme génétique de tri non dominé (NSGA-II) couplé à des modèles ANN ont été utilisées pour résoudre différents problèmes d'optimisation multi-objectifs. Les auteurs ont constaté que la méthode NSGA-II est plus efficace que la méthode DF et offre divers ensembles de solutions non dominées qui répondent aux exigences en termes de qualité de surface, de productivité et de force de coupe, ce qui conduit à une meilleure compétitivité.

Laouissi et al. **[64]** ont mené une étude comparative entre deux céramiques en nitrure de silicium (Si_3N_4) revêtue et non-revêtue lors du tournage de la fonte EN-GJL-250. Les résultats ont révélé que la céramique revêtue permettait d'obtenir une meilleure rugosité de surface, un effort de coupe minimale et une usure (VB) faible par rapport à la céramique non revêtue. Aussi les deux céramiques ont généré des rugosités inférieures à 1µm **(Figure I.35)**.

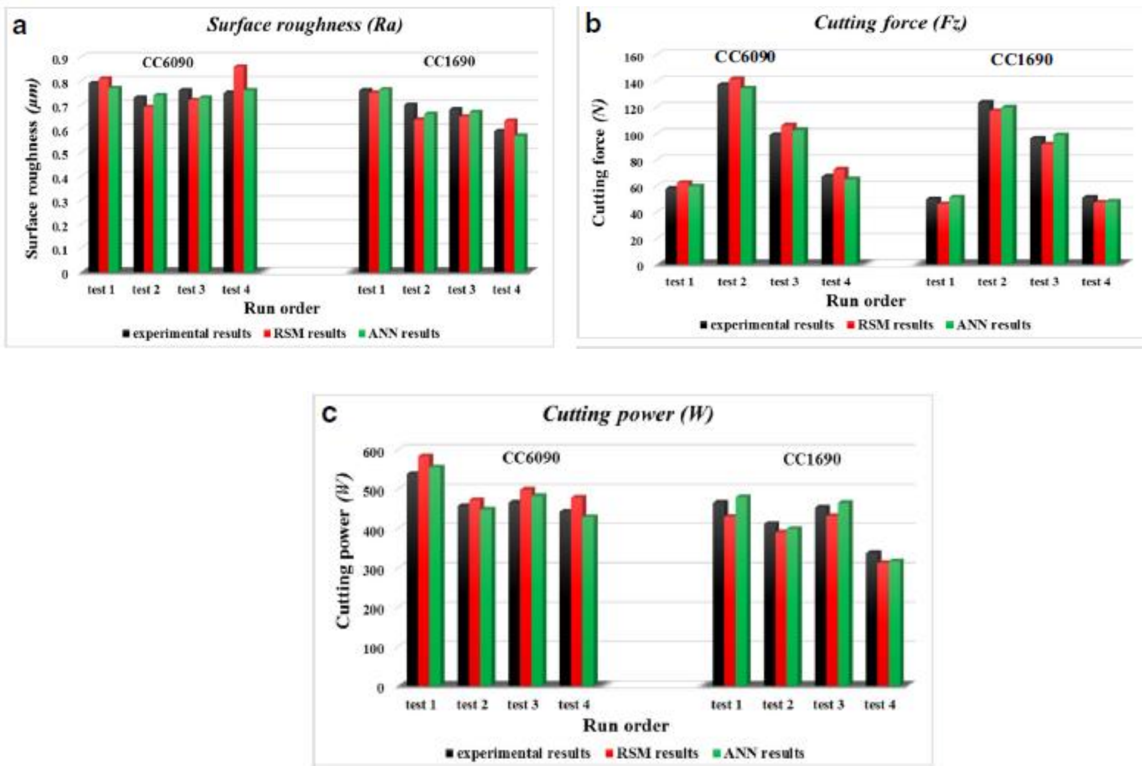


***Figure I. 35** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour les deux outils de coupe* **[64]**.

Dans une autre étude similaire Laouissi et al. **[65]** déclarent que pour les deux céramiques utilisées (CC1690 et CC6090), la rugosité de surface est largement influencée par l’avance (*f*), la contribution varie de (65 à 86) % et l’effort (*Fz*) est influencé par la profondeur de passe, la contribution varie de (64.73 à 69.63) %. Les auteurs ont affirmé aussi que les modèles de régression proposés peuvent prédire avec satisfaction les réponses (*Ra*, *Rz* et *Fz*).

S.Tooptong et al.**[66]** ont comparés l’usure en dépouille et en cratère de deux outils de coupe en carbure revêtu avec multicouche et un outil non revêtu pendant l’usinage à sec de fonte à graphite compacté (CGI) et une fonte à graphite en flocons (FGI). Ils ont montré que l'usure en dépouille et en cratère étaient plus élevées pour le FGI que pour le CGI lors de l'utilisation d'outils en carbure non revêtus aux vitesses de coupe de 150, 250 et 350 m / min **(Figure I.36)**.

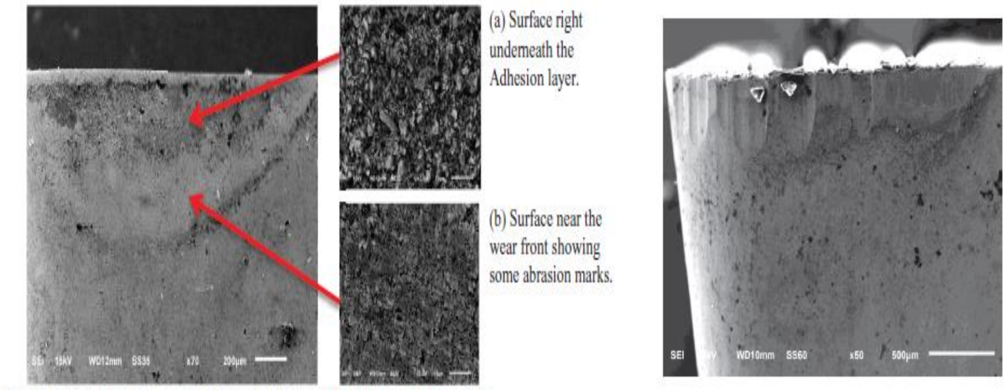


Figure I. 36 *L'usure en dépouille des outils de coupe* **[66]**.

KM Kumar et al. **[67]** ont réalisé une étude expérimentale sur l'usinabilité de la fonte ductile nodulaire avec des inserts en nitrure de bore cubique et en carbure de tungstène. L'impact de divers paramètres de processus comme la profondeur de coupe (*D*), la vitesse de coupe (*S*) et l'avance (*F*) sur la force de coupe de la fonte nodulaire a été étudié et optimisé en utilisant la méthode RSM. Le fonte nodulaire a été tourné à sec avec deux types d'outils de coupe différents, à savoir le CBN et l' outil en carbure de tungstène revêtu (TiCN + Al_2O^3 + TiN) pour évaluer l'influence des paramètres de coupe. La vitesse de coupe employée pour ces essais est de 102 174 et 245 m / min avec des vitesses d'avance de 0.051, 0.102 et 0.143 mm / tr avec une profondeur de coupe de 0.5, 0.75 et 1 mm. L'outil revêtu de carbure de tungstène a bien fonctionné par rapport à l'outil CBN lors de l'usinage avec de la fonte nodulaire en termes de réduction de la force de coupe et d'une meilleure rugosité de surface.

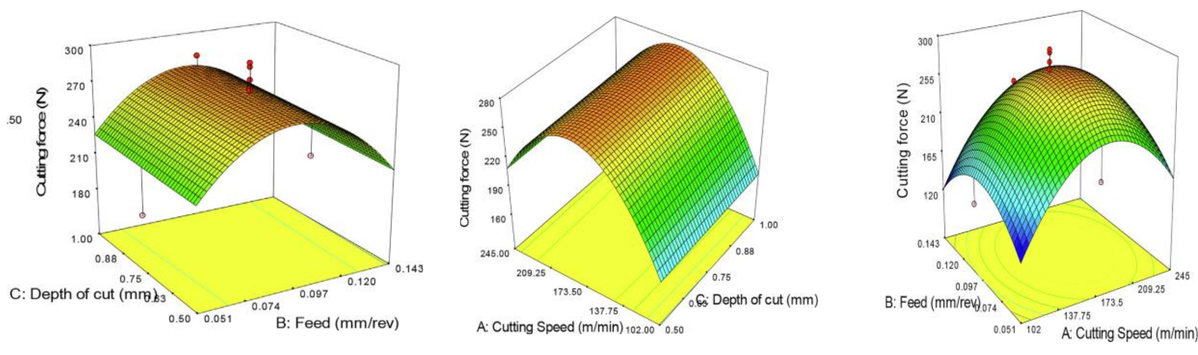
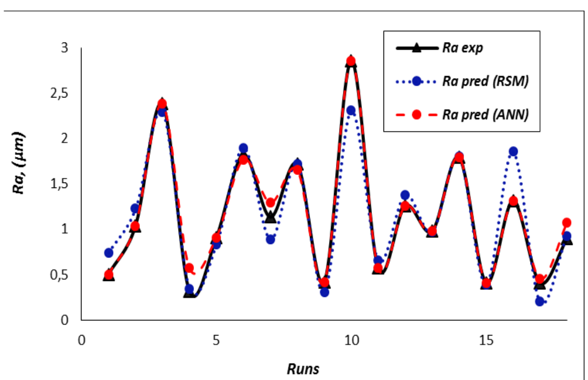
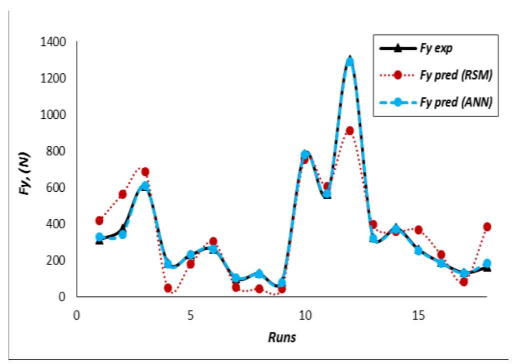


Figure I. 37 *Effet des paramètres de coupe sur l'effort de coupe lors le tournage de la fonte SG par un outil en CBN* **[67]**.

Bouzid Lakhdar **[68]** ont modélisé et optimisé les paramètres d'usinage représentés par la profondeur de coupe (*ap*), l'outil de coupe (*Tool*), la vitesse de coupe (*Vc*) et la vitesse d'avance (*f*) lors du tournage en acier trempé AISID3 à l'aide des techniques RSM, ANN et DFA. Afin de déterminer la technique la plus efficace, les modèles développés sont comparés en termes de coefficient de détermination (R^2), d'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et d'erreur prédictive de modèle (*MPE*). De plus, une optimisation multi-objectifs utilisant l'analyse de la fonction de désirabilité (DFA) a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que les modèles ANN (Pour *Ra* : R^2 = 93%, *RMSE* = 0,02%, *MPE* = 4,99% et pour *Fy*: R^2 = 94%, *RMSE* = 2,52%, *MPE* = 3,11%) ont obtenu de meilleurs résultats que ceux développés en utilisant l'approche RSM (Pour *Ra* : R^2 = 90,4%, *RMSE* = 0,051%, *MPE* = 18,21% et pour *Fy* : R^2 = 79 %, *RMSE* = 31,17%, *MPE* = 55,92%). En conséquence, les modèles ANN obtenus pour (*Ra*) et (*Fy*) sont exploités comme fonction objective pour l'optimisation de la réponse en appliquant la technique DFA. Le niveau optimal des paramètres d'entrée pour la désirabilité combinée est finalement identifié comme *ap1 – Tool3 – Vc3 – f1* pour les deux (*Ra*) et (*Fy*) avec une erreur maximale de *2,94%*.



Experimental, RSM, and ANN predicted results for (*Ra*).



Experimental, RSM and ANN predicted results for (*Fy*).

***Figure I. 38** Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites RSM et ANN* **[68]**.

S.O. Sada et S.C. Ikpeseni **[69]** ont évalues la performance des modèles de réseau neuronal artificiel (ANN) et de système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) dans la prédiction des réponses d'usinage (taux d'enlèvement de métal et usure de l'outil) lors le tournage d'acier AIS. Les deux techniques ont montré d'excellentes capacités à prédire les réponses du processus d'usinage.

Cependant, une comparaison des deux techniques indique que la technique ANN est relativement supérieure à la technique ANFIS, compte tenu de la précision de ses résultats en termes d'erreurs de prédiction obtenues pour les techniques ANN et ANFIS de 6,1% et 11,5% pour le MRR et de 4,1% et 7,2% pour l'usure de l'outil respectivement. Le coefficient de détermination (R^2) obtenu à partir de l'analyse confirme la préférence de l'ANN avec une valeur maximale de 92,1% enregistrée en utilisant l'ANN par rapport à celle de l'ANFIS de 73%. L'expérience révèle en outre que la performance de la technique ANN peut donner les résultats les plus idéaux lorsque les bons paramètres sont utilisés.

P. UMAMAHESWARRAO et al. **[70]** ont réalisés une optimisation des paramètres d'usinage est réalisée par la technique TOPSIS (Technique for order of preference by similarity to ideal solution) lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 avec des outils en nitrure de bore cubique nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN), 32 essais ont été réalisées en faisant varier la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, le rayon du nez et l'angle de coupe négatif afin d'identifier la solution optimale. L'analyse de la variance (ANOVA) a été déployée pour vérifier l'impact des paramètres de coupe sur les réponses. Ils sont ressorts que le régime optimal devrait être la suivante : vitesse 200 tr/min, avance 0,1 mm/tr, profondeur de coupe 0,8 mm, rayon du nez 1,2 mm et angle de coupe négatif de 45º, ce qui conduit à la valeur des variables de réponse optimales suivantes force d'usinage 561.163 N, rugosité de surface 0.507µm et température de surface de la pièce 84.38°C.

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases scientifiques nécessaires à la compréhension de cette étude. Des notions de base concernant l'évolution des matériaux à outils, les revêtements des outils de coupe et une attention particulière a été réservée au couple outil / matière et qui concerne le couple CBN / fonte. Aussi, une partie de ce chapitre a été focalisée sur les paramètres technologiques d'usinage et qui concerne ; la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe, l'usure des outils et dernier lieu la température de coupe. La dernière partie de ce chapitre traite l'état de l'art sur l'usinabilité des fontes ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe. Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils et matériels mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

CHAPITRE II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les moyens et le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences en tournage. Le matériel comprend, un tour parallèle pour la réalisation des essais de chariotage, une plateforme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, deux rugosimètres 2D et 3D pour déterminer la rugosité de la pièce usinée. Ces équipements sont nécessaires pour déterminer le comportement du couple (outil-matière) et l'évolution des différents paramètres technologique de sortie lors du tournage de la fonte EN-GJL250, tels que les efforts de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*), les critères de la rugosité de surface (*Ra*, *Rz* et *Rt*), la puissance de coupe (*Pc*), l'effort spécifique de coupe (*Ks*), le débit du coupeaux enlevé (*MRR*) et l'usure de l'outil (*Vb*). Les essais ont été effectués au laboratoire de mécanique et de structure (LMS) du département de Génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2 Matériels utilisés

II.1.1 Machine-outil

Un tour parallèle de la société tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN40C a été utilisé pour effectuer les expériences d'usinage. Cette machine-outil a une puissance sur la broche de 6.6 KW (**Figure II.1**). Les fréquences de rotation de la broche sont commandées par un variateur de fréquence qui nous permet d'atteindre une vitesse de rotation jusqu'aux 2100 tr/min. Les avances disponibles sur la machine-outil varient : 0.08 à 6.4 mm/tr



Figure II. 1 *Tour parallèle modèle SN40C*

II.1.2 Matériau des éprouvettes utilisées

Les expériences d'usinage programmées ont été réalisées sur des éprouvettes en fonte grise (EN-GJL-250). Ce matériau est largement utilisé dans les entreprises de fabrication mécanique en raison de son faible coût, son excellente propriété mécanique, ses bonnes propriétés de frottement et d'usure. Il est utilisé comme, des bagues, les brides, les paliers, les poulies, les turbines, les variateurs, les engrenages et les freins…etc. Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suivies :

- ✓ Densité : 7.2 g/cm^3.
- ✓ Module d'élasticité : 250 MPA.
- ✓ Dureté du matériau : 250 HB
- ✓ Module d'élasticité : 110 KN/mm2
- ✓ Allongement : 0.8 %

Les éprouvettes utilisées pour les efforts de coupe et la rugosité de surface et les essais d'usure sont coupées sur des barres plaines en fonte grise (EN-GJL-250) avec une scie mécanique (**figure II.2**). Ces éprouvettes possèdent un diamètre de 90 mm et une longueur de 400 mm de diamètre (**figure II.3**).



***Figure II. 2** Scie mécanique*



Figure II. 3 *Les éprouvettes utilisées*

Les fontes ordinaires ou fontes grises à graphite lamellaire EN-GJL-250 (anciennement appelé Ft25) représente le meilleur compromis entre les propriétés d'utilisation et le prix de revient (fonderie +usinage). C'est la plus courante des fontes grises pour la construction mécanique, les équipements urbains, le chauffage industriel et domestique. La fonte est un alliage de fer et de carbone avec un taux de carbone élevé compris entre 2.1% et 6.67% avec addition de silicium, de manganèse, de soufre et de phosphore.

La composition chimique de la fonte grise EN-GJL-250 utilisé est indiquée dans le tableau 1.

Tableau II. 1 Compositions chimique de la fonte grise EN-GJL-250.

Elément de composition	Pourcentage%
Fe	92.35
C	4
Si	2.1
Mn	0.76
Cu	0.28
P	0.11
Cr	0.13
Ni	0.03
Ti	0.015
Co	0.003

II.2.3 Outils de coupe utilisés

Les plaquettes utilisées pour l'usinage des éprouvettes sont en CBN avec un revêtement PVD en (TiN) connue commercialement comme CBN7050. Sa désignation normalisée est

SNGA120408 T01020 (**Figure II.4**), elle est amovible de forme carrée et possède 08 arêtes de coupe. La plaquette CBN7050 est une nuance composée d'une forte teneur en CBN (87%) avec un liant métallique. Elle est exclusivement réservée à l'usinage fortement interrompu dans les aciers trempés et la finition des fontes **[7]**.

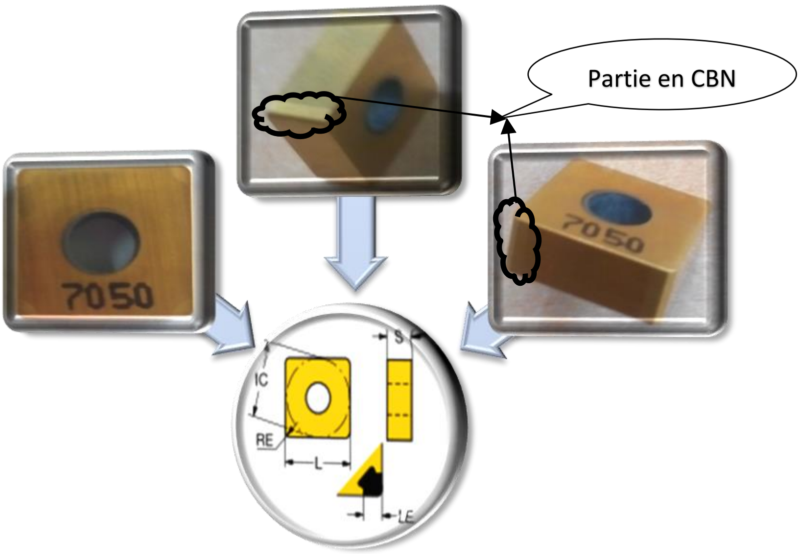
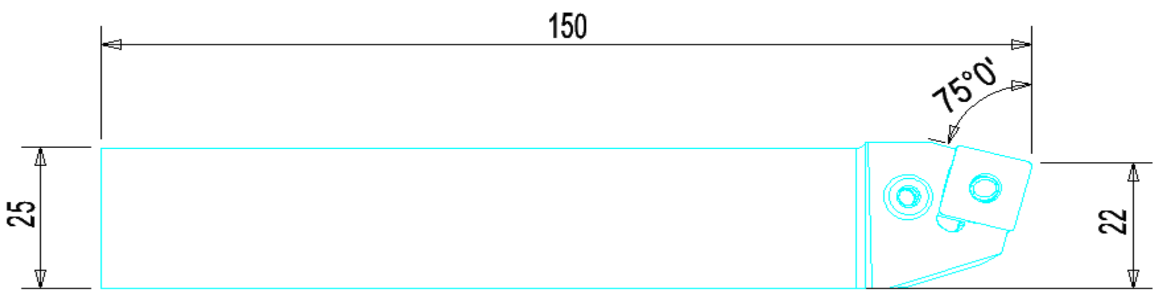


Figure II. 4 *Plaquette CBN7050 utilisée* (*SNGA120408 T01020*)

II.2.4 Porte outil

La plaquette CBN7050 utilisée dans cette étude, est fixée mécaniquement sur un porte-outil de désignation (ISO) PSBNR25×25M12 avec la géométrie suivante : γ = -6°,λ = -6°, α = +6° et χ_r =75° (**Figure II.5**) et (Tableau II.2).



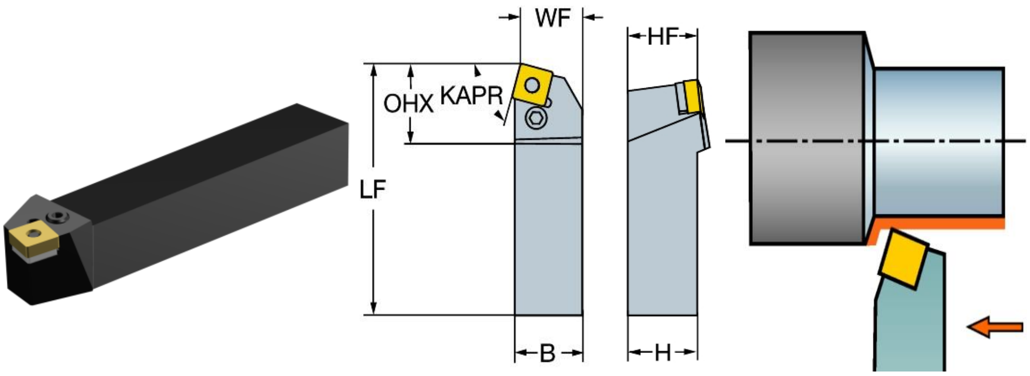


Figure II. 5 *Porte-outil utilisé.*

Hauteur de queue (H)	Largeur de queue (B)	Porte à faux Maximal (OHX)	Longueur Fonctionnelle (LF)	Largeur Fonctionnelle (WF)	Hauteur Fonctionnelle (HF)
25	25	27.5	150	22	25

Tableau II. 2 *Dimensions du porte-outil utilisé* **[7]**.

Ce porte-outil est fixé sur la plateforme Kistler montée sur le banc de la machine-outil avec deux vis de serrage comme le montre la **figure II. 6**.

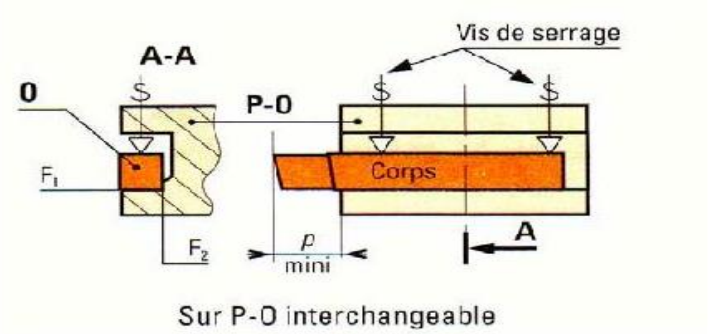


Figure II. 6 *Fixation de porte-outil.*

II.3 Appareils de mesure utilisés pour les paramètres de sortie

Pour mesurer les différents paramètres de sortie tels que ; les efforts de coupe, la rugosité, l'usure et la température de coupe, nous avons utilisé les appareils suivants :

- ✓ Dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- ✓ Rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.
- ✓ Rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface.
- ✓ Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).
- ✓ Pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401.

II.3.1 Mesure des efforts de coupe

Le dynamomètre de type (KISTLER 9257 B) a été utilisé pour la mesure de l'amplitude des efforts de coupe. Ce dynamomètre est parmi les appareils de mesure les plus fiables pour prendre la valeur des trois composantes de l'effort de coupe pendant l’opération d’usinage, il est composé de plusieurs éléments auxquels on mentionne : la plate-forme KISTLER, l'amplificateur de signaux KISTLER 5019b 130, le micro-ordinateur avec le logiciel DynoWare.

La **figure II.7** présente l’enchainement des équipements et la méthode utilisée pour la mesure des efforts de coupe :

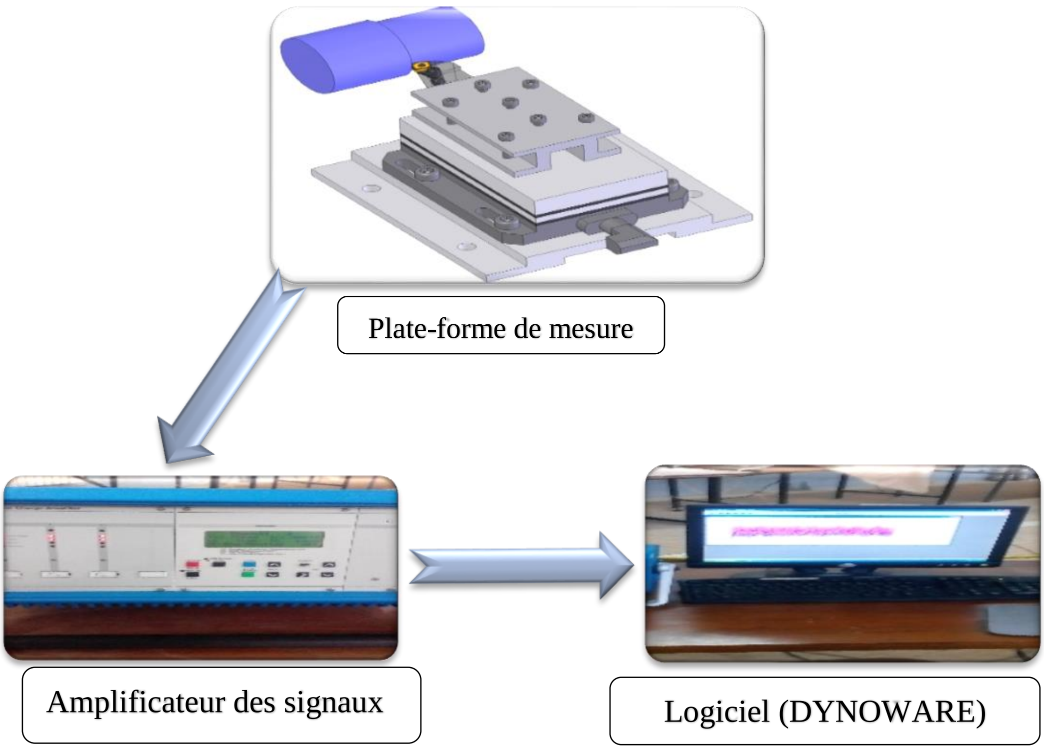


Figure II. 7 *Chaîne de mesure des efforts de coupe.*

Le principe de la mesure des efforts de coupe par le dynamomètre est basé sur le phénomène piézo-électrique. Quand on fait les essais de chariotage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce usinée, d'autre part, l’outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la

machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (**figure.II.8**). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (**figure II.9**).

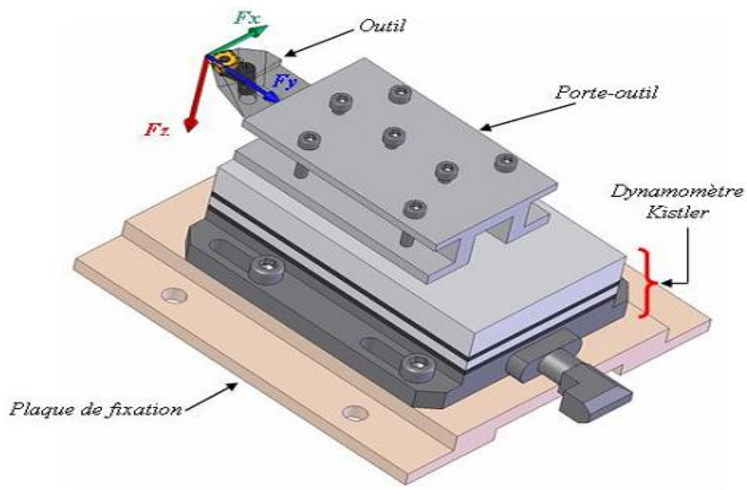


Figure II. 8 *Montage du dynamomètre sur la table de la machine.*

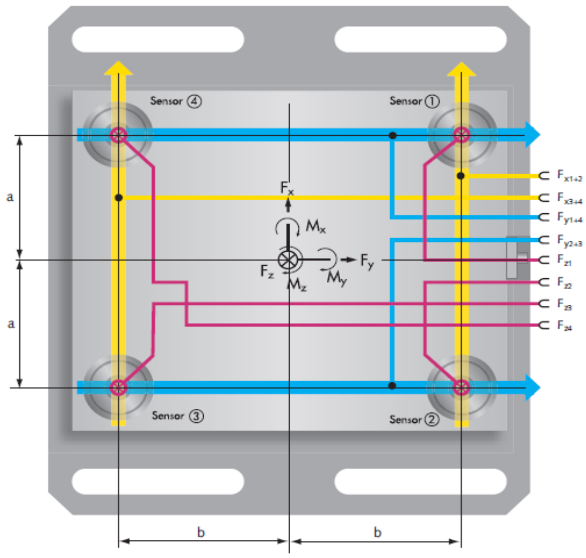


Figure II. 9 *Capteur d'effort de coupe KISTLER.*

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de l'usinage sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux KISTLER 5019b 130. Ces signaux amplifiés sont après acquis par le micro-ordinateur grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DynoWare) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du chariotage est alors directement exprimé en trois composantes *Fx*, *Fy* et *Fz*.

La **figure II.10** montre un exemple d’acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l’effort de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel).

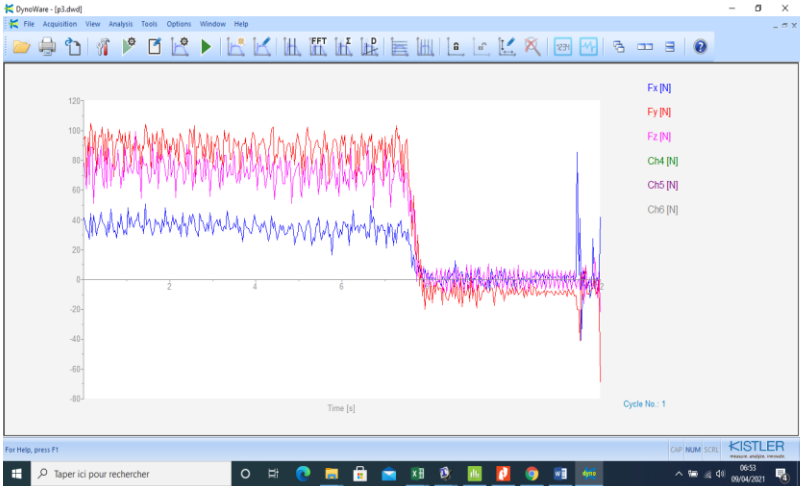


Figure II. 10 *Exemple d’acquisition du logiciel DYNOWARE.*

II.3.2 Rugosimètres 2D et 3D pour la mesure de la rugosité

a) Rugosimètre 2D

Pour la mesure des différents critères de rugosité (*Ra*, *Rz*, *Rt*) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) Surftest 210 (Mitutoyo), muni d'une pointe en diamant de 5 µm et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée. La longueur de palpage (Cut-off) est de 4 mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8x5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 µm) pour *Ra* et de (0.3 à 160µm) pour *Rt* et *Rz*. Les différents critères de la rugosité de surface ont été obtenus instantanément après chaque passage de l’outil (essai), pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précisions, la mesure de la rugosité a été effectuée directement sur la pièce en position de travail sans démonter celle-ci du tour. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120 °. La norme pour la mesure de la rugosité de surface est ISO 4287. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (**figure II.11***)*.

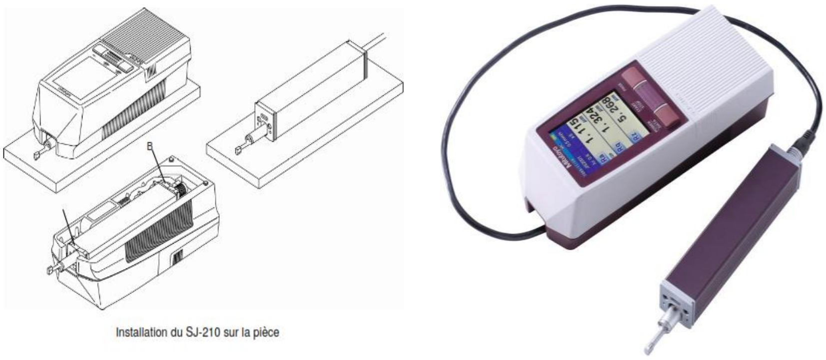


Figure II. 11 *Rugosimètre 2D (Surftest 210).*

b) Rugosimètre 3D

Pour une meilleure compréhension de la topographie de la surface de la pièce usinée, nous avons utilisé un appareil de métrologie optique du système multi-capteur conçu pour lire finement les surfaces de composants (*AltiSurf ® 500).* Cet appareil permet d'effectuer des mesures optiques sur toutes les surfaces (rugueuses, transparentes, noires, polies, ...). Cette station de métrologie est conforme aux besoins en mesure laboratoire que ce soit par la diversité des matériaux à analyser (métaux, verre, textile…) ou les contrôles réalisés (rugosité, forme, dimensionnel) **[71]**. Le principe de cet appareil est de relever des séries de profils qui assemblés automatiquement, permettent de reconstituer la morphologie de pièces et matériaux afin d'appliquer des paramètres d'analyse en termes de rugosité, de tribologie, de formes et de phénomènes topographiques, de dimensions.

L'appareil *AltiSurf ®500* standard est composé :

- D'une base en granite ;
- D'un ensemble inférieur ou base de déplacement : plusieurs tables de déplacements motorisés de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs. Une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- De différents accessoires : quatre poignées de transport amovibles. Fixées sur le marbre, elles facilitent le déplacement de la platine. Un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires.

La chaine de mesure de la rugosité en 3D est composée de (**Figure II.12**) :

a) Boîtier de contrôle Phénix

b) Télécommande externe

c) Logiciel d'acquisition Phénix

d) Logiciel d'analyse Altimap



Figure II. 12 *Plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf @500.*

La figure II.13 illustre un exemple d'acquisition avec le rugosimètre en 3D.

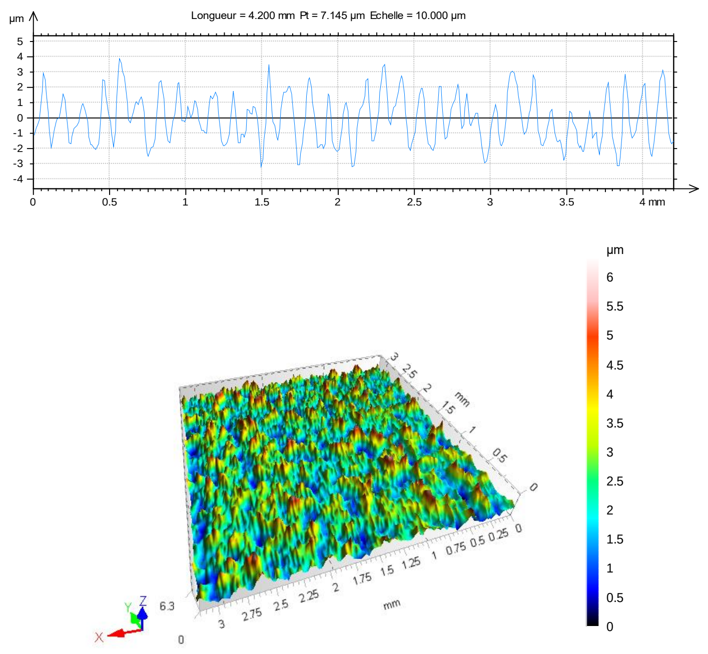


Figure II. 13 *Rugosité de surface en 3D mesurée par la plate-forme Altisurf 500.*

II.3.3 Mesure de l'usure de l'outil CBN

Pour la mesure de l'usure en dépouille (*Vb*) de l'outil CBN, on a utilisé Le microscope de marque *Visuel Gage 250*, avec un micro-ordinateur fourni d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0* (**Figure II.14**). Les valeurs de (*Vb*) sont mesurées comme suite :

En plaçant la plaquette de coupe testée sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette de coupe que l'on corresponde avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure.

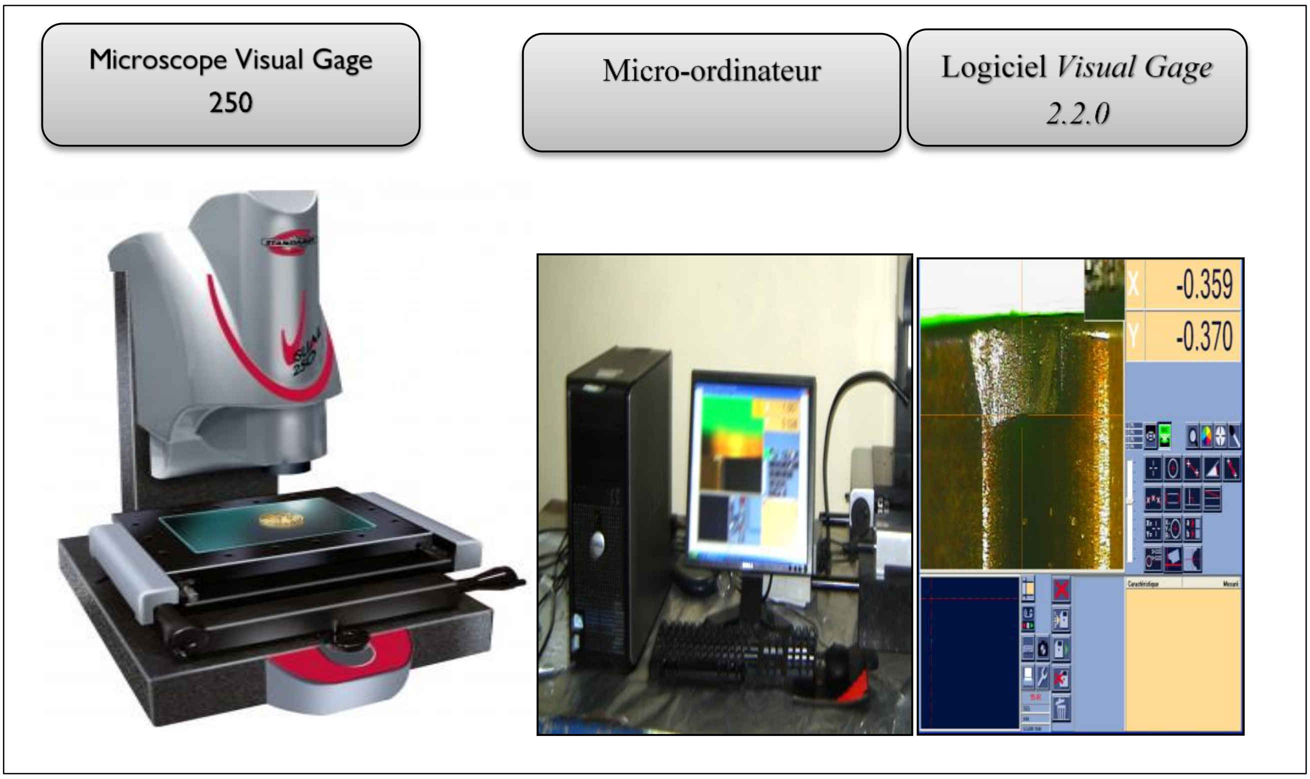


Figure II. 14 *Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).*

II.3.4 Mesure de la température de coupe

Pour prendre les valeurs de la température générée au niveau de la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 (**Figure II.15**), qui présente

les caractéristiques suivantes : une gamme de mesure -40 °C à 550 °C (-40°F à 1022 °F), une gamme spectrale : 8 à 14 microns, une précision de ± 1 % ou ± 1 °C (2 °F), avec temps de réponse 500 ms (95 %), et un laser de mono point.

Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il centralise les rayons de l'infrarouge de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (maximale, moyenne et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degrés Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées.



Figure II. 15 *Pyromètre à infrarouge.*

La **figure II.16** illustre la configuration expérimentale et les instruments utilisés pour la mesure des composantes des efforts de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*), les critères (*Ra*, *Rz et Rt*) de la rugosité de surface en 2D et en 3D et l'usure (*Vb*) de l'outil de coupe CBN 7050.

II.3.5 **Autres équipements**

- Un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;

- Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce.

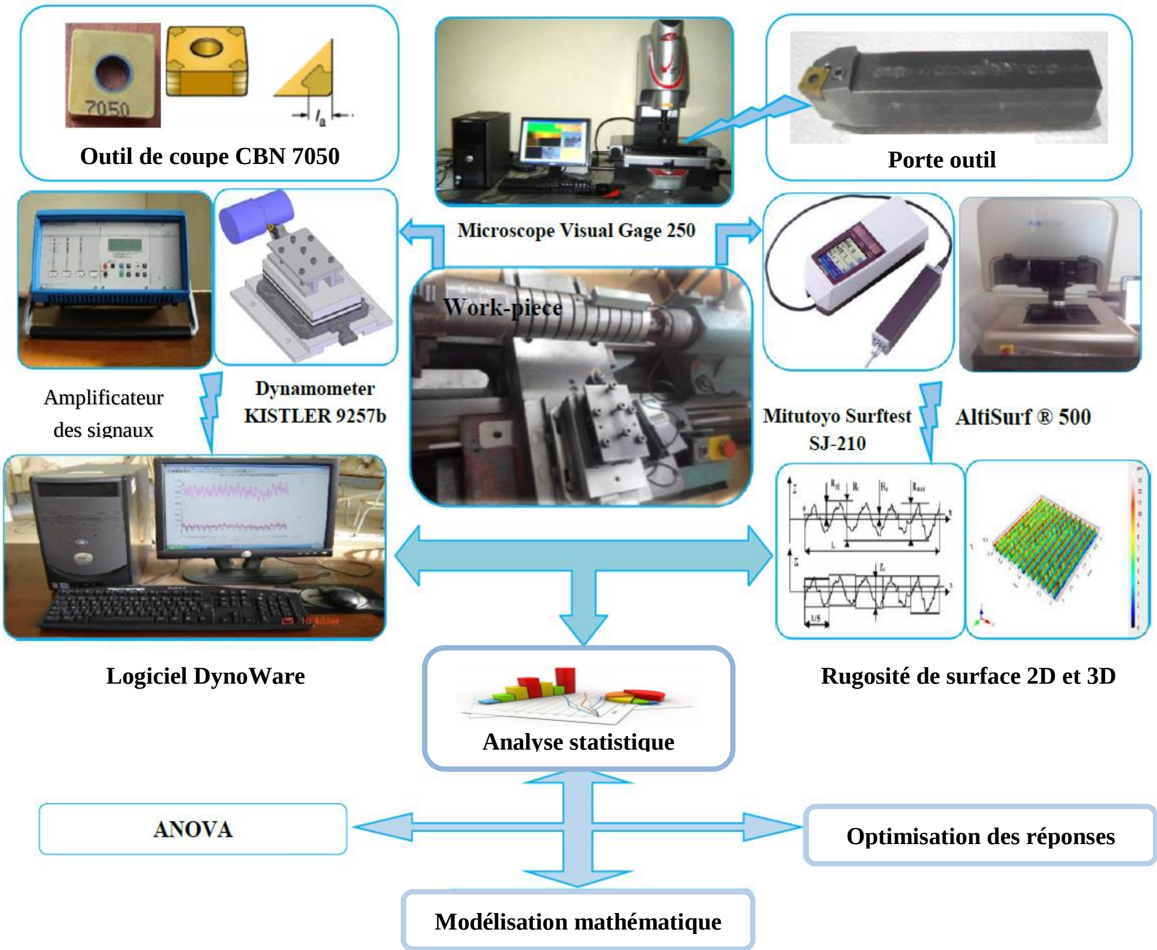


Figure II. 16 *Schéma de la configuration expérimentale.*

II.4 Plan d'expérience et conditions de coupe

Dans notre étude les conditions de coupe (vitesse de coupe (*Vc*), avance par tour (*f*) et la profondeur de passe (*Doc*)) ont été considérées comme des paramètres d'entrée (X_1, X_2, X3 …X_n). Les efforts de coupe (*Fx, Fy, Fz et Ft*), les critères de rugosité de surface (*Ra, Rz et Rt*), la puissance de coupe (*Pc*), la pression de coupe (*Kc*) et la quantité d'enlèvement de matière (*MRR*) ont été considérées comme des paramètres de sortie (Y_1, Y_2, Y_3, ….Y_n) lors l'usinage de la fonte grise EN-GJL-250 avec l'outil CBN7050. Nous avons utilisé deux méthodes d'expérimentation pour identifier l'influence des paramètres d'entée sur les paramètres de sortie.

- Méthode paramétrique
- Méthode multifactorielles

II.4.1 Méthode paramétrique

La méthode paramétrique est utilisée pour évaluer l'action d'un seul facteur *X* sur un paramètre *Y*. L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné *X* [$Xi \in \{X_{min}, X_{max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants. Pour chaque $X = Xi$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Yi, (i = 1÷ N). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur *X*, tout en maintenant les autres facteurs constants.

Tableau II. 3 Réalisation d'essais d'après la méthode paramétrique

N°	*Facteur variable*	*Paramètre de sortie*						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_j	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{j1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{j2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{j3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{ji}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{jN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Dans notre cas, les conditions de coupe utilisées pour les essais paramétriques pour évaluer les paramètres de sortie (*Fx, Fy, Fz, Ft, Ks, Pc, Ra, Rz, Rt*, (*Vb*), Rugosité 3D) sont indiquées dans le tableau II.4.

Tableau II. 4 Conditions de coupe pour les essais paramétriques

Paramètres constants	Valeurs fixes	Paramètres variables	Valeurs variables
Paramètres de sortie	***Fx, Fy, Fz, Ft, Ks, Pc, Ra, Rz et Rt***		
f (mm/tr)	0.08	*Vc* (m/min)	194, 273, 382, 546
Doc (mm)	0.3		
Vc (m/min)	546	*f* (mm/tr)	0.08, 0.14, 0.20, 0.28
Doc (mm)	0.3		
Vc (m/min)	546	*Doc* (mm)	0.3, 0.6, 0.9, 1.2
f (mm/tr)	0.08		
Paramètres de sortie		***(Vb)***	
f (mm/tr)	0.08	*Vc(m/min)*	450, 600, 750

Doc (mm)	0.2		
Paramètres de sortie		***Rugosité 3D***	
Vc (m/min)	382	*f (mm/tr)*	0.08, 0.24
Doc (mm)	0.6		
Vc (m/min)	450	*f (mm/tr)*	0.11, 0.20
Doc (mm)	0.3		

II.4.2 **Méthode multifactorielle**

La méthode multifactorielle permet nous de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs X_i sur le paramètre Y_i avec la relation de la forme suivante :

$$Y_i = f(X1, X2, \dots \dots \dots \dots, Xn) \qquad \textbf{(II.1)}$$

- Dans notre cas de recherche nous avons considéré l'influence de trois paramètres d'entrés de coupe (*Vc*, *f*, *Doc*) qui présentent les facteurs de base X_i sur les paramètres technologiques de coupe (rugosité, effort de coupe, puissance de coupe et le taux d'enlèvement de la matière).

II.4.3 **Démarche et plan d'expérience adopté**

Les paramètres du régime de coupe (*Vc*, *f*, *Doc*) sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement de la matière représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été effectués suivant la méthode de planification des expériences. Nous nous servirons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance de tournage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 10), c'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

a) Établissement du but et des objectifs des essais ;
b) Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
c) Choix du type de plan d'expérience ;
d) Conduite des essais ;
e) Détermination des facteurs influents ;
f) Modélisation rapide des réponses ;
g) Recherche des paramètres optimaux ;

h) Validation des résultats.

Dans le choix du type de plan d'expérience, la stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre cas, le plan d'expérience Taguchi (L_{27}) a été adopté. Nous avons choisi les 3 colonnes 1, 2 et 5 du tableau orthogonal L_{27} (3^{13}) de Taguchi, le tableau II.5 présente le plan L_{27} (3^{13}) de Taguchi.

Tableau II. 5 Tableau orthogonal L_{27} (3^{13}) de Taguchi

L_{27} (3^{13}) Test	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1

23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Le tableau II.6 présente les différents paramètres d'entrés (vitesse de coupe, l'avance et profondeur de passe) avec leurs niveaux bas, moyens et élevés.

Tableau II. 6 Conditions de coupe pour le plan L_{27} de Taguchi

Niveaux	Vitesse de coupe *Vc* (m/min)	Avance *f* (mm/tr)	Profondeur de passe Doc (mm)
Bas	273	0.08	0.30
Moyenne	382	0.14	0.60
Élevé	546	0.20	0.90

Le tableau. II.7 illustre les 27 combinaisons réelles des paramètres d'entré (*Vc*, *f* et *Doc*) du plan de Taguchi L_{27}. L'objectif de ce plan est d'analyser l'influence de différentes combinaisons de niveaux sur les paramètres de sortie (ANOVA) et d'exploiter ces résultats pour faire une modélisation du processus.

Tableau II. 7 Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L_{27}).

N° d'essais	Paramètres de coupe		
	***Vc* (m/min)**	***f* (mm/tr)**	***Doc* (mm)**
1	273	0.08	0.3
2	273	0.08	0.6
3	273	0.08	0.9
4	273	0.14	0.3
5	273	0.14	0.6
6	273	0.14	0.9
7	273	0.20	0.3
8	273	0.20	0.6

9	273	0.20	0.9
10	382	0.08	0.3
11	382	0.08	0.6
12	382	0.08	0.9
13	382	0.14	0.3
14	382	0.14	0.6
15	382	0.14	0.9
16	382	0.20	0.3
17	382	0.20	0.6
18	382	0.20	0.9
19	546	0.08	0.3
20	546	0.08	0.6
21	546	0.08	0.9
22	546	0.14	0.3
23	546	0.14	0.6
24	546	0.14	0.9
25	546	0.20	0.3
26	546	0.20	0.6
27	546	0.20	0.9

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos essais expérimentaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure utilisés**,** les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences selon la méthode paramétrique et multifactorielle. Dans le chapitre III qui suit, nous présenterons une étude sur l'usinabilité de la fonte grise EN-GJL-250 par une plaquette de coupe en nitrure de bore cubique CBN7050 en utilisant la méthode paramétrique. Ces essais permettront d'évaluer les paramètres de performance à savoir : la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe, la pression de coupe, l'usure et la température de coupe.

CHAPITRE III

Usinabilité de la fonte grise EN-GJL-250

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats d'une étude paramétrique qui concerne l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) sur les efforts de coupe, l'effort spécifique, la puissance de coupe et la rugosité de surface lors de l'opération de chariotage sur la fonte EN-GJL-250 par un outil en nitrure de bore cubique revêtu (CBN 7050). Nous présentons aussi les résultats des essais sur la topographie de surface 2D et 3D afin d'analyser les effets de la variabilité des conditions de coupe sur le changement topographique de la surface usinée. En dernier lieu, les résultats de l'usure en dépouille (VB) de l'outil CBN en fonction du temps d'usinage à différentes vitesses de coupe ainsi que la corrélation entre l'usure et la rugosité de surface, l'effort de coupe et la température de coupe, seront aussi exposés dans ce chapitre.

III.2. Résultats des essais paramétriques

III.2.1 Evolution des efforts de coupe (*Fx, Fy et Fz*)

a) L'influence de la vitesse de coupe (*Vc*)

La **figure III. 1** expose les résultats de l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) en fonction de la vitesse de coupe (*Vc*) avec une avance et une profondeur de passe fixes (*f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.3 mm). L'analyse des résultats montre en générale une diminution des trois composantes en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe. Ceci est dû à la température élever dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à l'enlèvement de la matière diminuent **[72]**. On remarque aussi que les trois composantes de l'effort chutent rapidement jusqu'à la valeur de *Vc*= 382 m/min, au-delà de cette valeur la diminution devient moins importante. Une augmentation de la vitesse de coupe de 194 à 546 m/min conduit à une diminution des trois composantes (*Fx, Fy* et *Fz*) de (28.42%, 45.71% et 30.47%) respectivement. Dans ce cas d'usinage, l'effort *Fy* est prépondérant par rapport aux autres composantes *Fx* et *Fz,* est la valeur maximale enregistrée de (*Fy*) est égale à 58.58N. Des observations semblables ont été évoquées par **[73-74].**

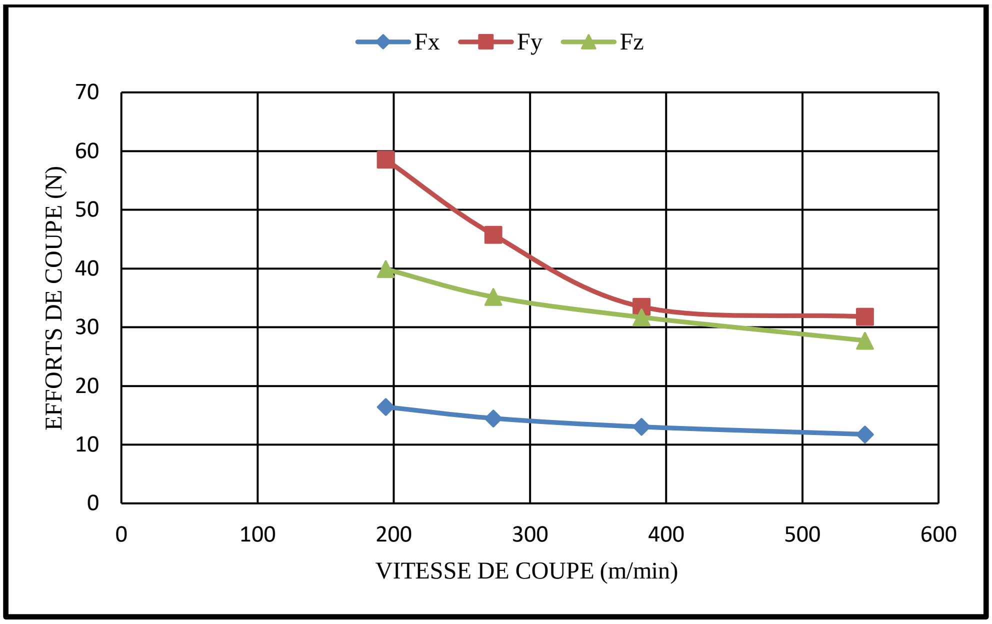


Figure III. 1 *Evolution des efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) en fonction de la vitesse de coupe.*

b) Influence de l'avance (*f*)

La **figure III. 2** illustre l'évolution de (*Fx*, *Fz* et *Fy*) en fonction de l'avance (*f*) pour une vitesse de coupe de 546 m/min et une profondeur de passe 0.3mm. L'analyse des résultats révèle que ce paramètre a une influence importante sur la composante *Fy* puis *Fz* et en dernier lieu *Fx*. Pour les différentes valeurs de *f*, on remarque que toutes les courbes tiennent une allure ascendante à cause de l'augmentation de section cisaillée. Cela s'explique par une résistance à la rupture plus importante nécessitant des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau **[75-76]**. Pour une augmentation de l'avance (*f*) de 0.08 à 0.28 mm/tr, on enregistre une augmentation de (290.26, 229.02 et 182.24) % de *Fy, Fz* et *Fx* respectivement.

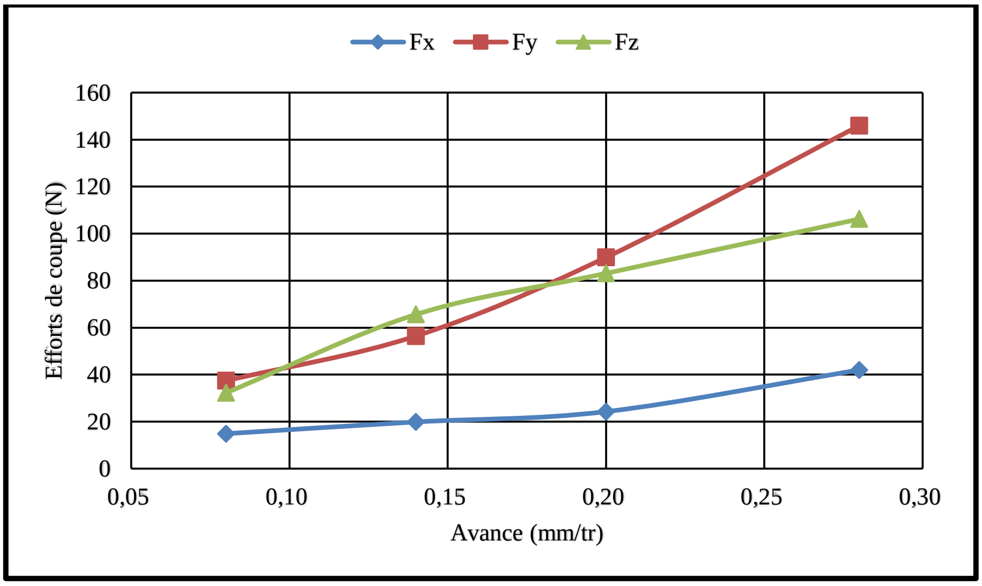


Figure III. 2 *Evolution des efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) en fonction de l'avance.*

c) L'influence de la profondeur de passe

La **figure III. 3** présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe (*Doc*) à *f* = 0.08 mm/tr et *Vc* = 546 m/min. Les résultats montrent que l'augmentation de la profondeur de passe (*Doc*) induit une élévation des trois composantes de l'effort de coupe. Avec l'augmentation de *Doc*, les conditions de coupe deviennent sévères car la section du copeau devient plus grande ce qui conduit à l'augmentation de la quantité de matière à enlever et cela nécessite des efforts de coupe importants. L'analyse des trois courbes montre que c'est l'effort *Fy* qui est prépondérant, suivie par l'effort *Fz* en dernier lieu de *Fx*. Sur le plan pratique, l'augmentation de *Doc* de 0.3 à 1.2 mm, conduit à une augmentation de (227.09, 160, 46.99) % de *Fy, Fz* et *Fx* respectivement. Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par **[77]**.

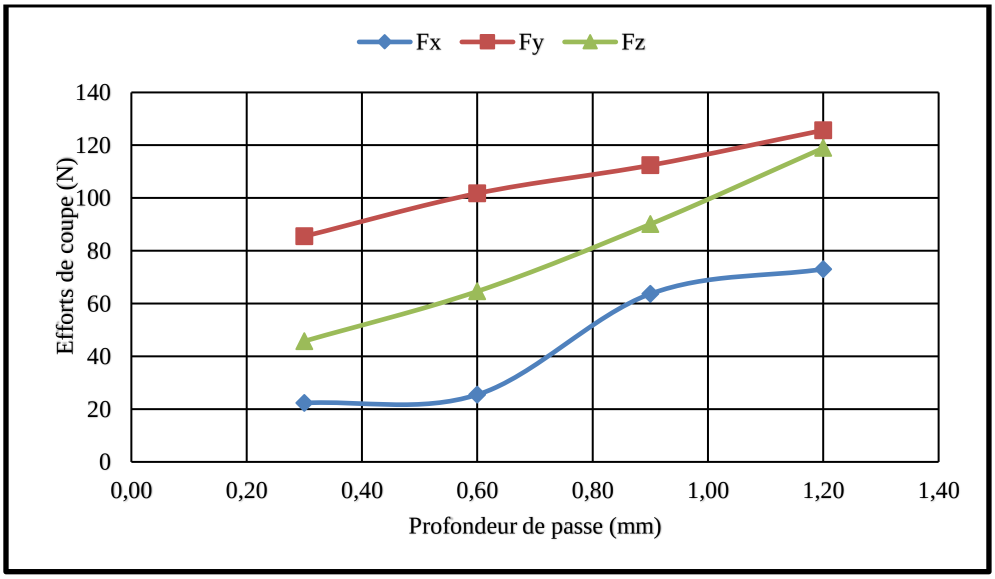


Figure III. 3 *Evolution des efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) en fonction de profondeur de passe.*

III.2.2. L'évolution de l'effort résultant

L'effort résultant est déterminé par la racine des trois composantes des efforts de coupe au carrée, l'effort résultant ($F_{rét}$) s'exprime par la formule suivante :

$$F_{rét} = \sqrt{(Fx)^2 + (Fy)^2 + (Fz)^2} \qquad \text{(III.1)}$$

Où : *Fx, Fy* et *Fz* sont les trois composantes des efforts de coupe.

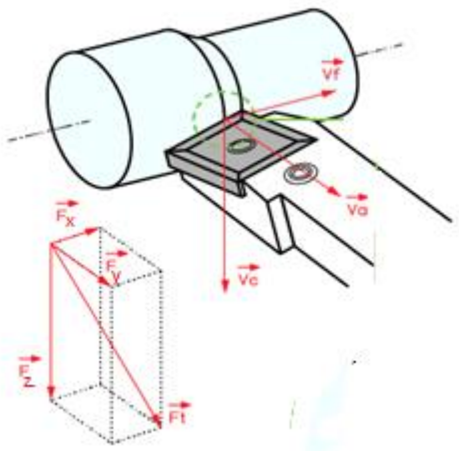


***Figure III. 4** Effort résultant.*

La **figure III. 5 (a)** présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe (*Vc*). L'analyse des résultats montre une décroissance de l'effort résultant avec l'augmentation de la vitesse de coupe. A la vitesse *Vc* = 194 m/min l'effort résultant est à sa valeur maximale 72.75 N. A la vitesse de coupe *Vc* = 546 m/min, l'effort résultant est à sa valeur minimum 43.80 N. L'augmentation de la vitesse de 194m/min à 546 m/min, conduit à une diminution de l'effort résultant de 39.79%.

La **figure III. 5 (b)** illustre l'évolution de l'effort résultant en fonction de l'avance (*f*). Cette figure montre que l'augmentation de l'avance induit un accroissement de l'effort résultant. Pour une avance de 0.08mm/tr, l'effort résultant est de 55.20 N et pour *f*= 0.28 mm/tr, $F_{rét}$= 195.29 N. L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une élévation de l'effort résultant de 235.67%.

La **figure III. 5 (c)** présente l'évolution de l'effort résultant ($F_{rét}$) en fonction de la profondeur de passe (*Doc)*. L'analyse des résultats montre une croissance de l'effort résultant pour une augmentation de la profondeur de 0.3 à 0.9mm. On enregistre une élévation de l'effort résultant de 88.76%, l'allure de la courbe de l'effort ($F_{rét}$) est presque linéaire.

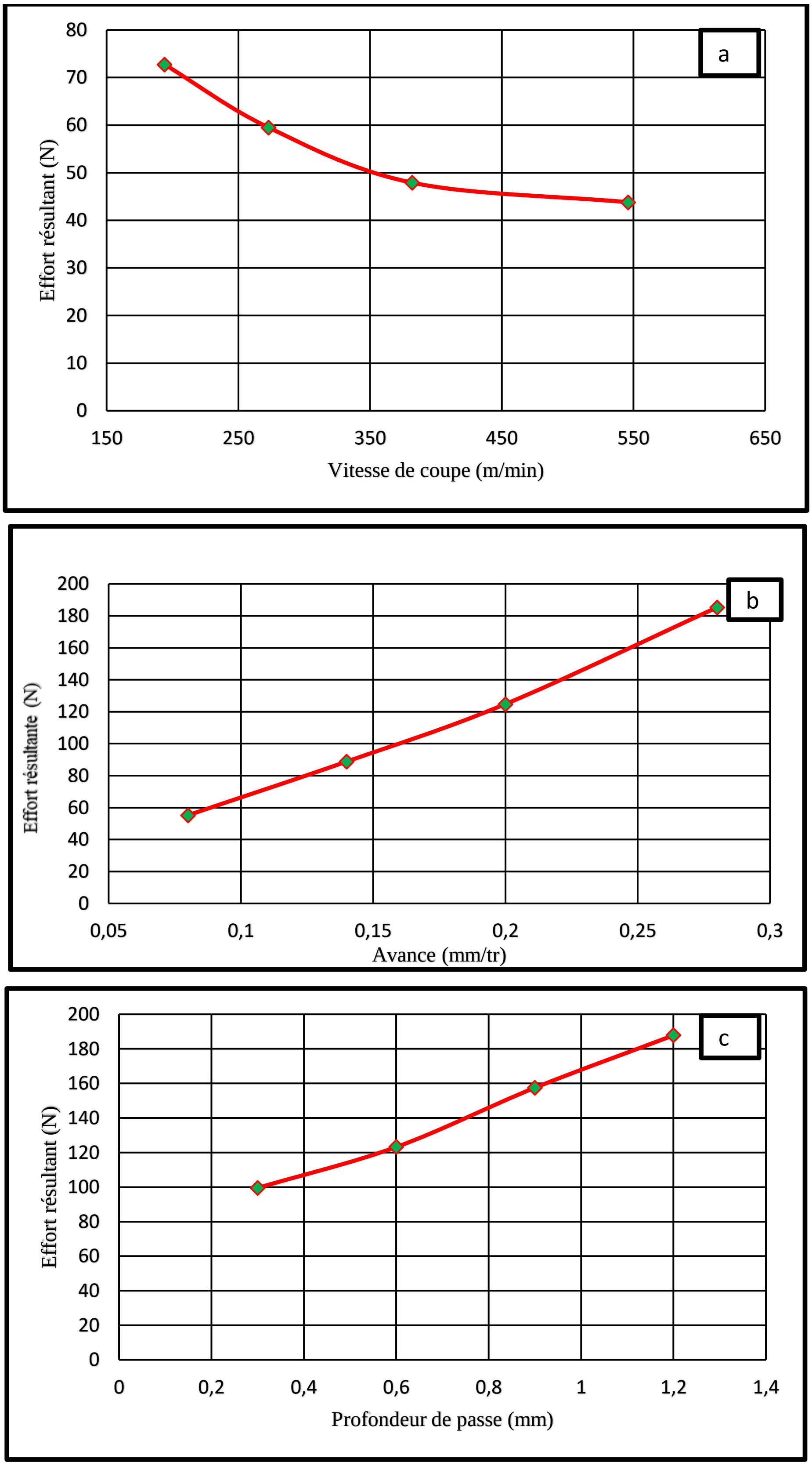


Figure III. 5 Evolution de l'effort résultant en fonction de :
a) vitesse de coupe, b) avance et c) profondeur de passe.

III.2.3 Evolution de l'effort spécifique de coupe (*Kc*)

Pour déterminer l'effort spécifique de coupe (*Kc*) lors de l'opération de tournage, nous avons utilisé l'équation suivante en se basant sur l'effort de coupe (*Fz*) :

$$Kc = \frac{Fz}{S} = \frac{Fz}{f * ap} \text{ (MPa)} \qquad \text{(III.2)}$$

a) Influence de la vitesse de coupe

La **figure III. 6** présente l'évolution de l'effort spécifique de coupe (*Kc*) en fonction de vitesse de coupe (*Vc*) avec une avance et profondeur de passe fixes (*f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.3 mm). On peut remarquer que (*Kc*) diminue avec l'augmentation de (*Vc*). Cette diminution peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant l'usinage à la surface de contacte pièce-outil-copeau, qui entraînent un adoucissement plastique important du matériau usiné et ainsi une diminution des efforts de coupe et par conséquent (*Kc*). L'augmentation de la vitesse de coupe de 194 à 546 m/min, conduit à une diminution de (*Kc*) de 72.83%. Avec la diminution de (*Kc*), la pression exercée sur l'arête de coupe devient faible, ce qui est préférable à l'outil, car dans ce cas il travaille dans des conditions moins sévères **[44]**.

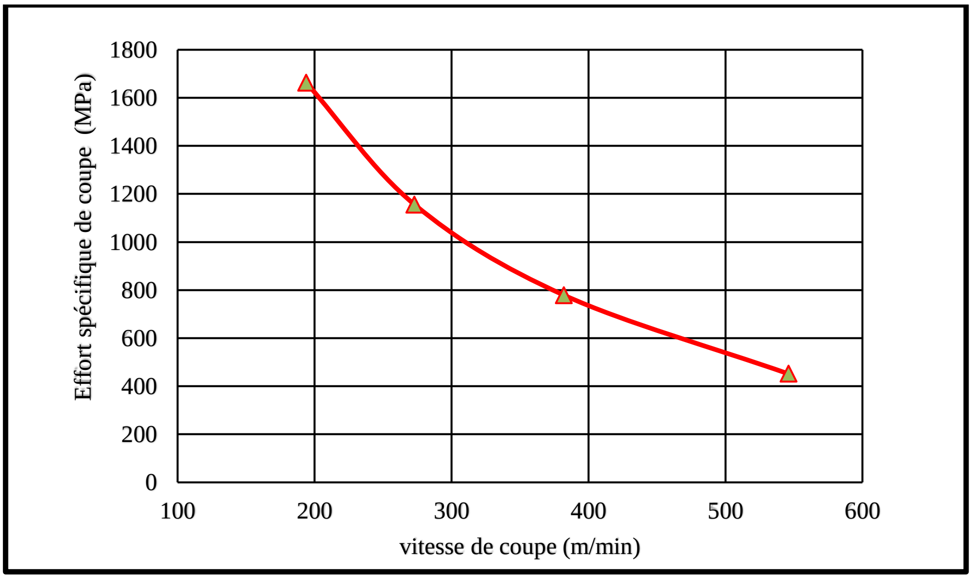


Figure III. 6 *Evolution de l'effort spécifique de coupe (Kc) en fonction de la vitesse de coupe.*

b) Influence de l'avance

La **figure III. 7** montre l'évolution de l'effort spécifique de coupe (*Kc*) en fonction de l'avance (*f*) à une vitesse de coupe de 546 m/min et profondeur de passe 0.3mm. Il est clair que l'effort spécifique diminue avec l'augmentation de l'avance (*f*). Cette diminution de (*Kc*) est probablement due à l'augmentation de la section du coupeau enlever. Pour une avance de 0.08

mm/tr, la pression exercée sur la pointe de l'outil est de *Kc* =1575 MPa, elle va ensuite diminuer jusqu'à *Kc* =1264.4 MPa pour *f* =0.28 mm/tr, donc on observe une diminution de (*Kc*) 19.69% avec l'augmentation de l'avance (*f*).

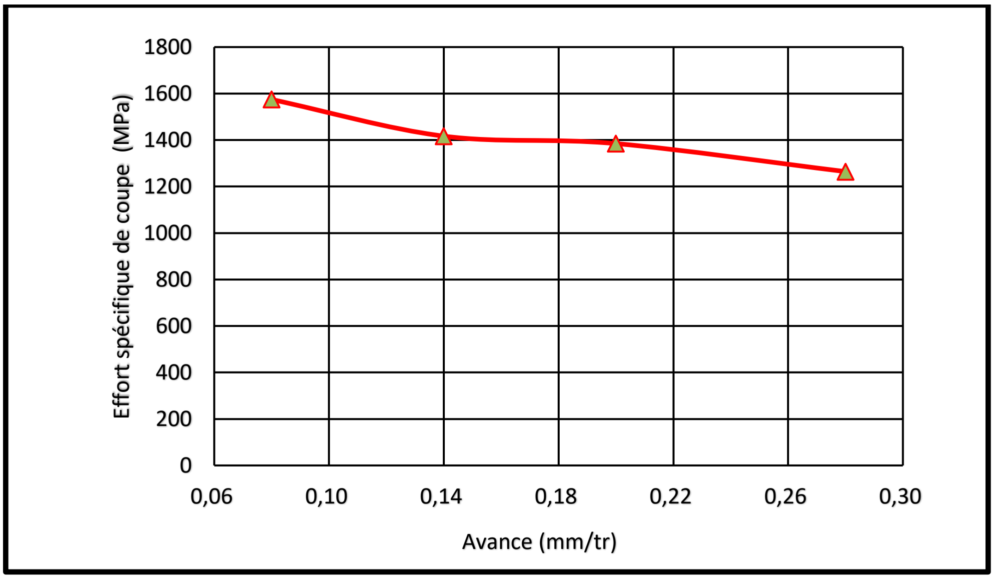


Figure III. 7 *Evolution de l'effort spécifique de coupe (Kc) en fonction de l'avance.*

c) Influence de la profondeur de passe

La **figure III. 8** montre l'évolution de (*Kc*) en fonction de profondeur de passe (*Doc*) à *f* = 0.08 mm/tr et *Vc* = 546 m/min. Lorsque la profondeur de passe varie de 0.3mm à 0.6mm on voie une chute rapide de l'effort spécifique (*Kc*) qui passe de 1906 MPa à 1346 MPa. Après la valeur de *Doc* = 0.6mm, on remarque une légère diminution de (*Kc*) pour atteindre la valeur de 1239MPa pour *Doc* =1.2mm. Finalement l'augmentation de *Doc* de 0.3 à 1.2mm, conduit à une chute de (*Kc*) de 35%. Cette diminution de l'effort spécifique de coupe est dû à l'augmentation de la section du coupeau enlever lors l'usinage. Des résultats semblables ont été trouvés par **[78]**.

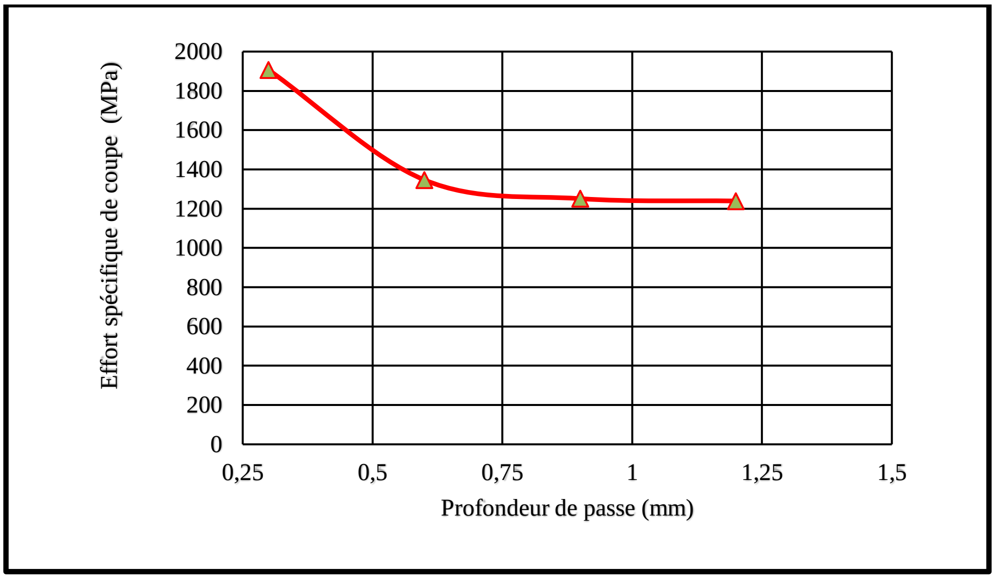


Figure III. 8 *Evolution de l'effort spécifique de coupe (Kc) en fonction de profondeur de passe.*

III.2.4 Evolution de la puissance de coupe (*Pc*)

La puissance de coupe (*Pc*) dépend essentiellement de l'effort tangentiel de coupe (*Fz*) et de la vitesse de coupe (*Vc*), elle est exprimée par la formule suivante :

$$Pc = \frac{Fz * Vc}{60} \text{ (W)} \qquad \text{(III.3)}$$

a) Influence de la vitesse de coupe

La **figure III. 9** montre l'évolution de la puissance de coupe (*Pc*) en fonction de vitesse de coupe (*Vc*) avec une avance de 0.08 mm/tr et profondeur de passe de 0.3 mm. Il est clair que l'accroissement de la vitesse de coupe induit une évolution presque croissante de (*Pc*). A la vitesse *Vc* =194 m/min, la puissance est de 129W, l'augmentation de (*Vc*) jusqu'à la valeur 546 m/min, conduit à une élévation de la puissance (*Pc)* à 252W, d'où une augmentation de 95.67%. Cette tendance peut être expliquée par le fait que la puissance de coupe est proportionnelle à la vitesse de coupe (Equation III.3). Des résultats similaires ont été évoqués par Y.Guo et al.**[79].**

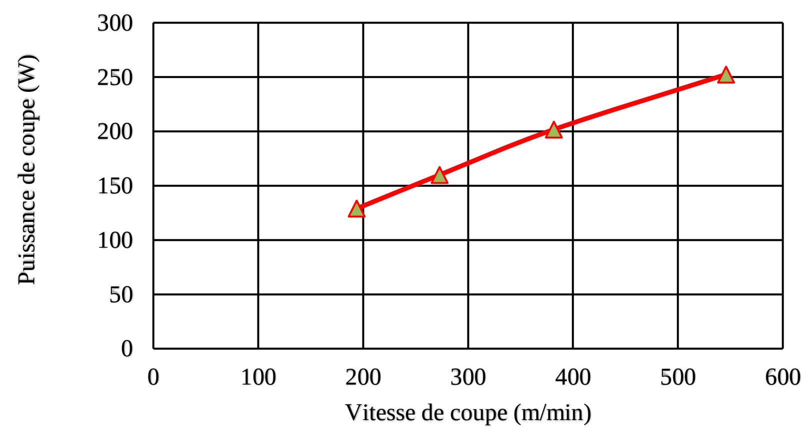


Figure III. 9 *Evolution de la puissance de coupe (Pc) en fonction de vitesse de coupe.*

b) Influence de l'avance

La **figure III. 10** montre l'évolution de la puissance de coupe (*Pc*) en fonction de l'avance (*Vc*) avec une vitesse de coupe 546 m/min et profondeur de passe 0.3 mm. D'après cette figure, on constate que l'augmentation de l'avance (*f*) conduit à une augmentation de la puissance de coupe (*Pc*). Cela peut être expliqué par l'augmentation de l'effort de coupe à cause de l'accroissement de la section du copeau. L'augmentation de (*f*) de 0.08 à 0.28 mm/tr conduit à un accroissement de la puissance de coupe (*Pc*) de 229%.

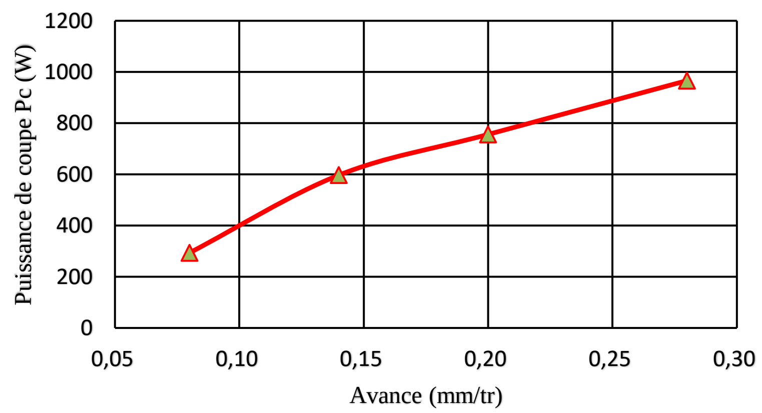


Figure III. 10 *Evolution de la puissance de coupe (Pc) en fonction de l'avance.*

c) Influence de la profondeur de passe

La **figure III. 11** montre l'évolution de la puissance de coupe (*Pc*) en fonction de la profondeur de passe (*Doc*) avec une avance de 0.08 mm/tr et une vitesse de coupe de 546 m/min. on remarque que l'augmentation de la profondeur de passe (*Doc*) conduit à une élévation de la puissance de coupe (*Pc*), ce qui est expliqué par l'amplification de l'effort de coupe à cause de l'accroissement de la section du copeau arraché. A cet effet, l'accroissement de la profondeur de passe (*Doc*) de 0.3 à 1.2mm, conduit à une élévation de la puissance de coupe (*Pc*) de 160%. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux de **[80]**.

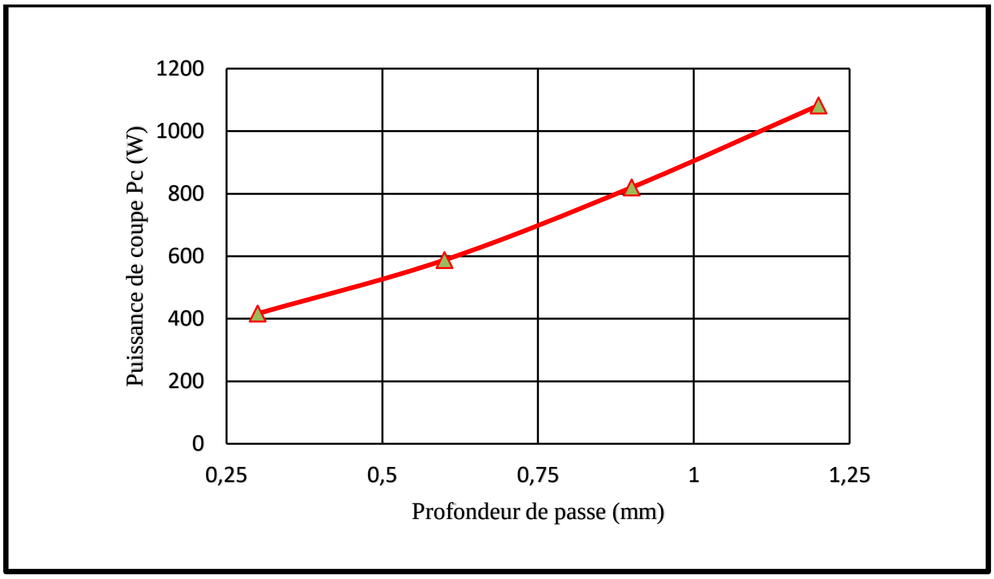


Figure III. 11 *Evolution de la puissance de coupe (Pc) en fonction de la profondeur de passe.*

III.2.5 Evolution des critères de la rugosité de surface (*Ra, Rz* et *Rt*)

Les **figures III. 12 13** et **14** illustrent l'évolution des critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction des paramètres du régime de coupe (la vitesse de coupe (*Vc*), l'avance (*f*) et la profondeur de passe (*Doc*)).

a) Influence de la vitesse de coupe

La **figure III. 12**, exprime l'évolution des critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction de la vitesse de coupe (*Vc*) à une avance *f* = 0.08mm/tr et une profondeur de passe *Doc*=0.3mm. L'analyse des résultats montre que les trois courbes sont divisées en deux zones. Dans la zone I, la vitesse (*Vc*) varie de 194 à 273m/min, les trois critères (*Ra, Rz* et *Rt*) chute rapidement de (21.39%, 35.92%, 38.28%) successivement. Dans la zone II, (*Vc*) varie de 273 à 546 m/min, la chute est moins rapide comparativement à la zone I, les trois critères (*Ra, Rz* et *Rt*) chute de (15.38%, 19.27% et 12.45%) respectivement. En fin on enregistre une diminution totale de

(50.74, 52.59 et 55.02) % de (*Ra, Rz* et *Rt*) respectivement lorsque (*Vc*) augmente de 194 à 546 m/min. Cette diminution est généralement attribuée au phénomène d'adoucissement du matériau a usiné, il devient plus ductile lorsque la vitesse de coupe augmente. D'autre part, la diminution des efforts de coupe aux vitesses de coupe élevées conduit ainsi à une stabilité relative du système usinant pièce-outil, ce qui a pour effet de diminuer la rugosité de surface. La même tendance des courbes de l'évolution de la rugosité de surface en fonction de (*Vc*) ont été observé par d'autres chercheurs **[81-82]**.

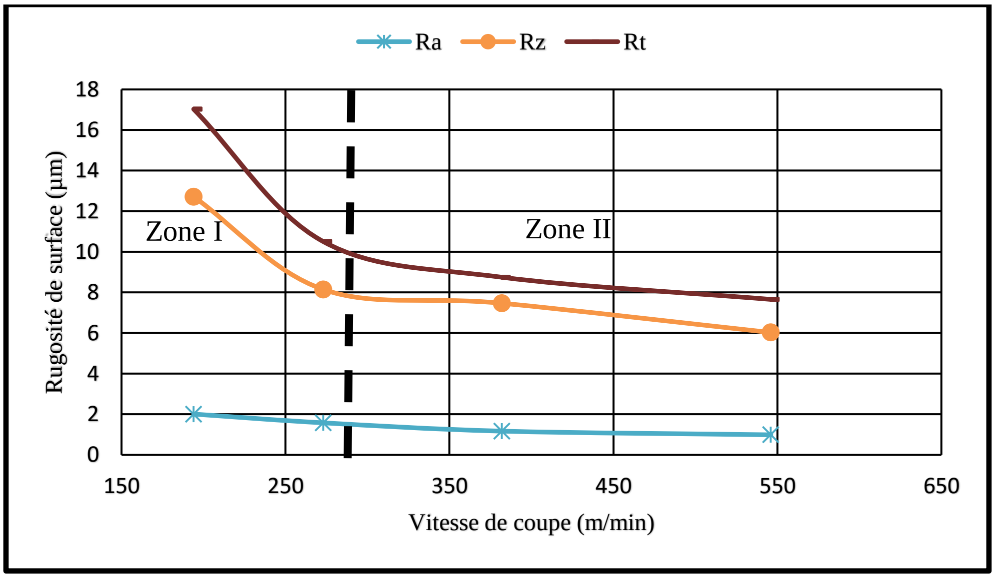


Figure III. 12 *Evolution des critères (Ra, Rz et Rt) en fonction de la vitesse de coupe.*

b) L'influence de l'avance

La **figure III. 13**, expose l'évolution des critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) en fonction de l'avance (*f*) à une vitesse de coupe et profondeur de passe fixes (*Vc*=546 m/min et *Doc*=0.3mm). On remarque qu'avec l'accroissement de (*f*) les trois critères augmentent d'une manière significative. L'augmentation de (*f*) de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une augmentation de (295.04, 212.52, 284.12) % pour (*Ra, Rz* et *Rt*) respectivement. Cette augmentation est expliquée par les sillons hélicoïdaux engendrés par le mouvement hélicoïdal outil-pièce, si l'avance est élevée donc les sillons sont plus profonds et plus larges. Des résultats semblables ont été rapportés par **[77-81]**.

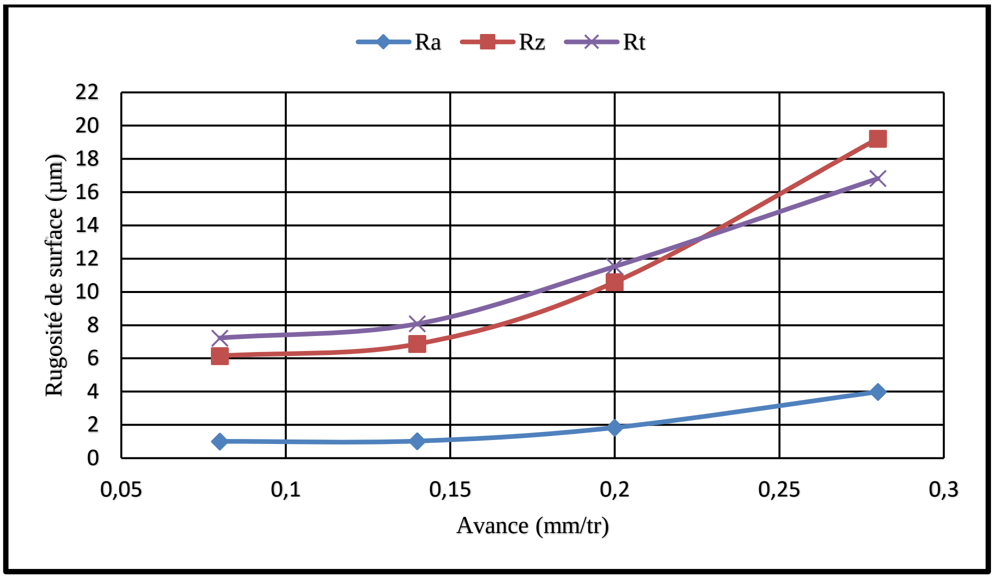


Figure III. 13 *Evolution des critères (Ra, Rz et Rt) en fonction de l'avance* (*f*).

c) Influence de la profondeur de passe

La **figure III. 14** présente l'évolution des critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction de la profondeur de passe (*Doc*) avec *f* = 0.08 mm/tr et *Vc* =546 m/min. Il ressort de ces courbes que l'influence de ce paramètre est moins importante que l'avance (*f*). Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce, ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. L'augmentation de la profondeur de passe de 0.3 à 1.2mm, conduit à une légère augmentation des critères (*Ra*, *Rz* et *Rt*) de (17.11%,7.28% et 12.22%) respectivement. Plusieurs recherches ont confirmé que ce paramètre à une influence très réduite sur la rugosité de surface **[79-83]**.

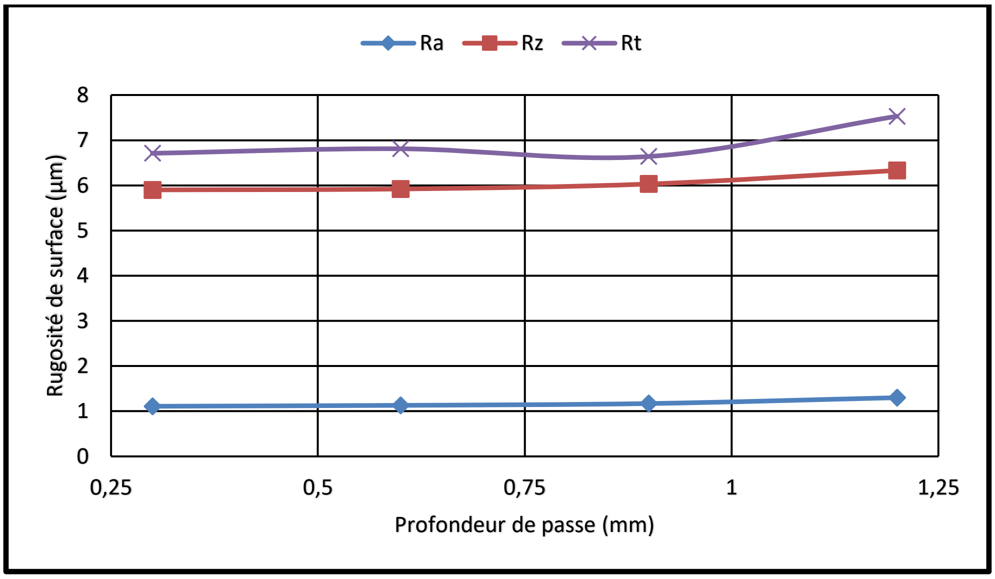
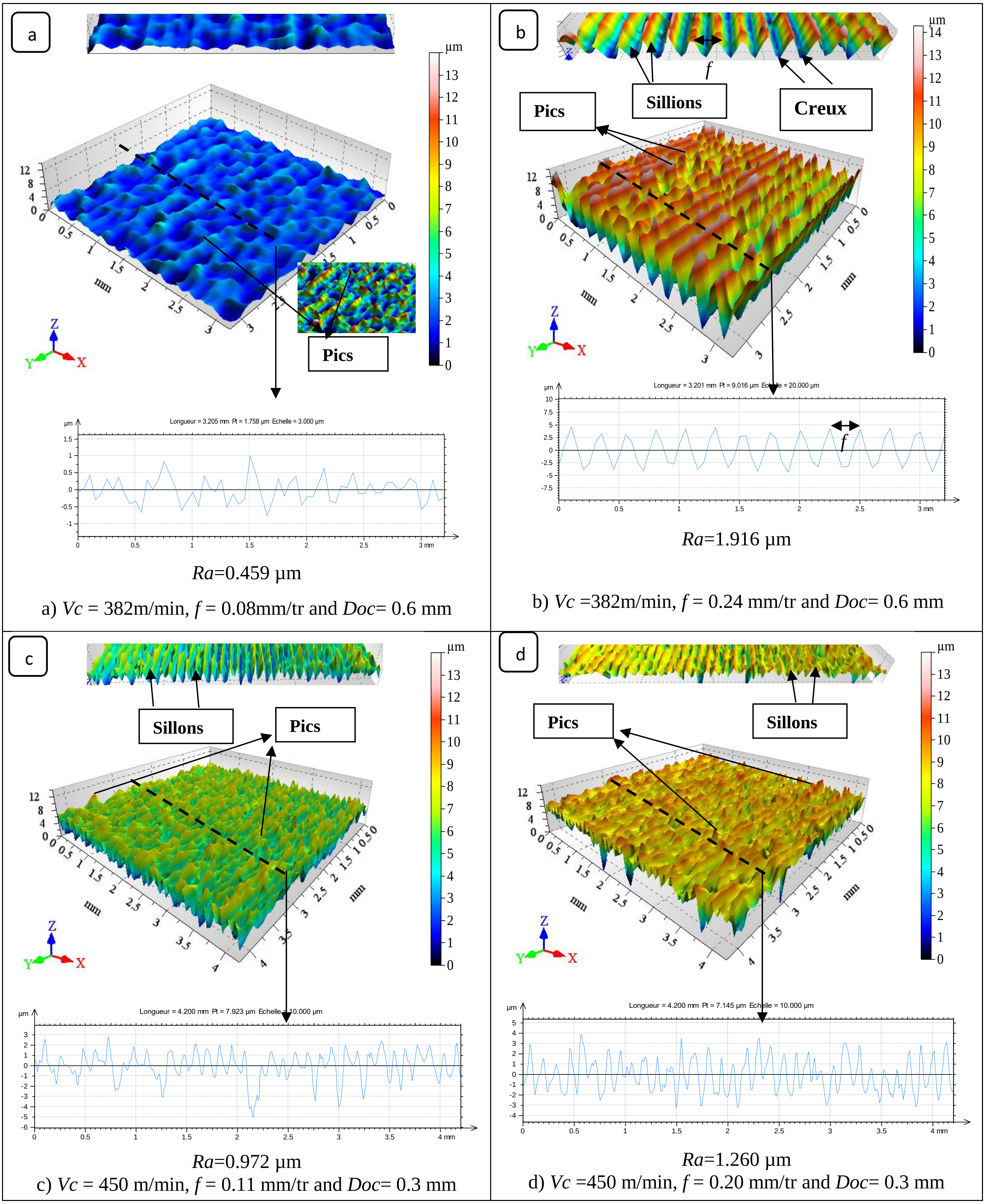


Figure III. 14 *Evolution des critères (Ra, Rz et Rt) en fonction de la profondeur de passe.*

III-3 Topographie de la surface en 3D

La **figure III. 15** (a, b, c et d) illustre les tracés 3D (même échelle) de la topographie de surface de la fonte EN-GJL-250 usinée par un outil CBN7050 pour quatre conditions de coupe. Les tracés 3D pour la figure III-15 (a et b) ont été obtenus avec deux avances (*f*=0,08 et 0,24) mm/tr, tout en gardant (*Vc*)= 382 m/min et (*Doc*) = 0.6mm constantes. Concernant la figure III-15 (c et d), les tracés 3D ont réalisés avec d'autres conditions de coupe, (*Vc*)=450 m/min et (*Doc*)=0.3 mm (constants), associées avec deux avances différentes (*f*= 0.11 et 0.2) mm/tr. Il ressort clairement de la figure III-15 que la rugosité (*Ra*) devient plus élevés pour des valeurs d'avance (*f*) plus élevées, le ratio $Ra_{(f=0.24)}/Ra_{(f=0.08)} = 4.17$ *pour* (*Vc*)=*382m/min et* le ratio $Ra_{(f=0.20)}/Ra_{(f=0.11)} = 1.29$ *pour* (*Vc*)=450m/min. On peut apercevoir aussi que les surfaces usinées sont constituées des pics et des creux dans une plage de sillons le long de la direction d'avance. Ces sillons sont la conséquence de la cinématique de la coupe en tournage. Plus les sillons sont profonds et larges, plus la valeur de l'avance (*f*) est élevée. Notons ici que les différentes topographies trouvées sont en fonction des conditions de coupe ainsi que des propriétés physiques et mécaniques du matériau usiné. Aussi, des irrégularités et des interruptions ont été observées tout le long des différents sillons générés. Cela est dû probablement à la structure de la fonte grise à graphite lamellaire qui s'effrite facilement lors de l'usinage. Des observations similaires ont été aussi rapportées par **[65]**.



Ra=0.459 µm
a) *Vc* = 382m/min, *f* = 0.08mm/tr and *Doc*= 0.6 mm

Ra=1.916 µm
b) *Vc* =382m/min, *f* = 0.24 mm/tr and *Doc*= 0.6 mm

Ra=0.972 µm
c) *Vc* = 450 m/min, *f* = 0.11 mm/tr and *Doc*= 0.3 mm

Ra=1.260 µm
d) *Vc* =450 m/min, *f* = 0.20 mm/tr and *Doc*= 0.3 mm

Figure III. 15 *Topographie de surface en 3D pour quatre conditions de coupe.*

III.4. Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps de coupe

III.4.1 Mode et progression de l'usure en dépouille de l'outil CBN7050

La **figure III.16** (a, b et c) montre l'évolution de l'usure en dépouille (*Vb*) de l'outil CBN7050 en fonction du temps d'usinage pour trois vitesses de coupe 450, 600 et 750 m/min avec *f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.2 mm. Les essais d'usure de longue durée ont été réalisés jusqu'à l'usure de l'outil CBN dépasse la valeur admissible [*VB*]=0.3mm. L'analyse de ces résultats montre clairement que l'usure (*Vb*) est très sensible à la variation du temps d'usinage et de la vitesse de coupe. L'examen de l'allure de l'évolution de l'usure (*Vb*) de la **figure III. 16** (a) (*Vc*=450 m/min), montre que (*Vb*) évolue normalement en fonction du temps d'usinage avec une pente légère. Lorsque le temps d'usinage est de 12 min, (*Vb*) atteint la valeur de 0.11mm, et après 22 min d'usinage, l'usure (*Vb*) accélère et dépasse la valeur de 0.22mm. Lorsque les contraintes thermomécaniques deviennent élevées **[84]**, on remarque que l'arête de coupe de l'outil CBN devient bien marquée par l'usure, dans ce cas l'usure (*Vb*) atteint la valeur maximale de 0.311mm.

Aux vitesses de coupe élevées (*Vc*= 600 et 750) m/min (**figures III. 16** (b) et **III.16** (c)), les contraintes termomécaniques sont sévères, comparativement à la vitesse de coupe (450) m/min et l'évolution de (*Vb*) devient pratiquement linéaire. Cette augmentation a pour effet d'accélérer les différents mécanismes d'usure de l'outil CBN et par conséquent la chute rapide des tenues **[75]**. Dans notre cas, l'usure admissible [*VB*]=0.3 mm (selon la norme ISO 3685 **[85]**) a été retenue comme critère principal d'usure car elle est la plus prépondérente comparativement à l'usure en cratère. La tenue (*T*) de l'outil de coupe CBN7050 revêtu (*TiN/PVD*) lors du tournage de la fonte grise EN-GJL-250 pour les trois vitesses a été déterminée comme suit : *T*=41.5 min pour *Vc*=450 m/min, *T*=18min pour *Vc*=600 m/min et *T*=7 min pour *Vc*=750 m/min. Donc on peut conclure que l'augmentation de la vitesse de coupe fait chutter la tenue de l'outil CBN et le Ratio $T_{\mathrm{Vc450}}/T_{\mathrm{Vc600}} = 2.30$, $T_{\mathrm{Vc600}}/T_{\mathrm{Vc750}} = 2.40$ et finalement $T_{\mathrm{Vc450}}/T_{\mathrm{Vc750}} = 5.9$.

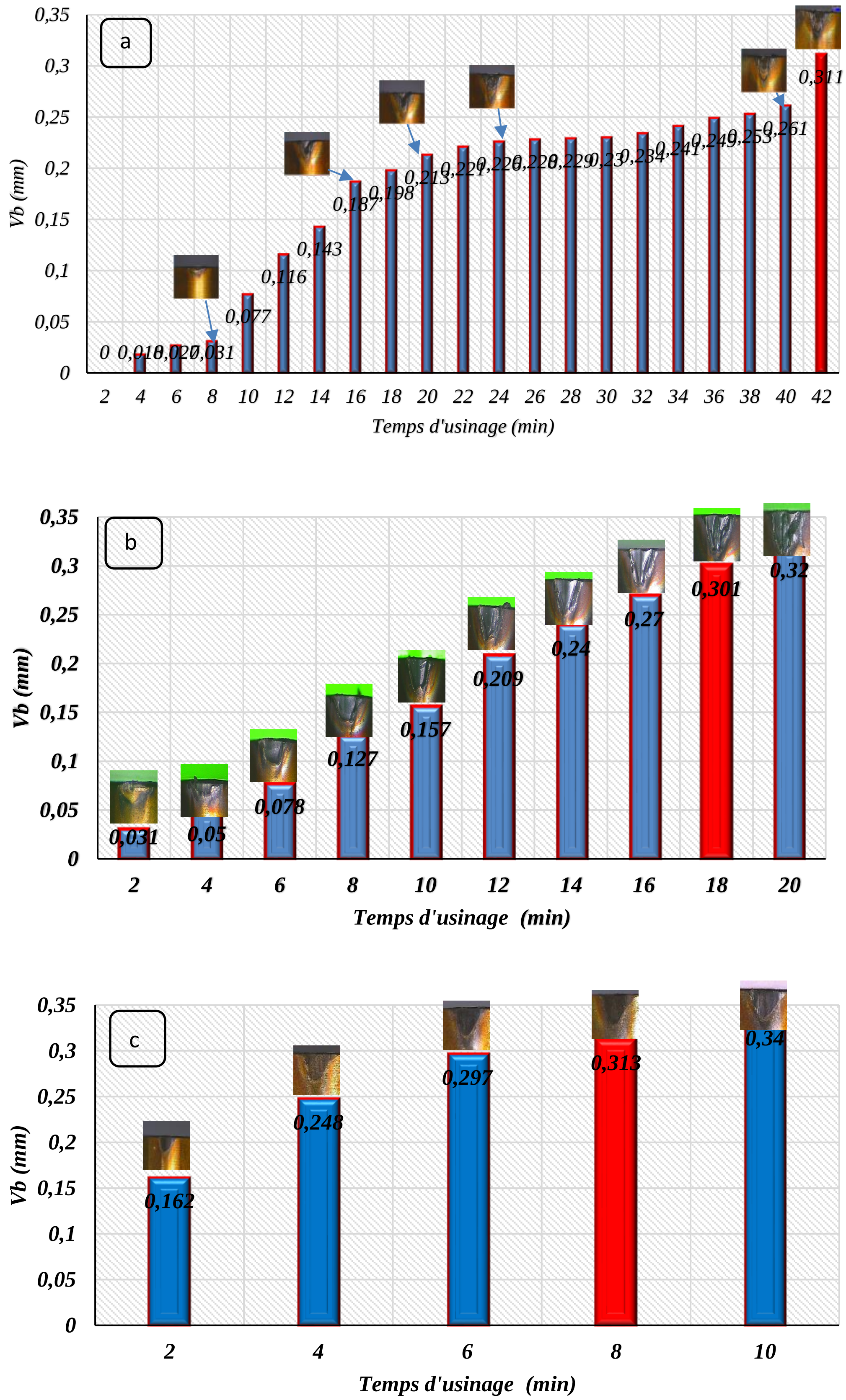


Figure III. 16 *Représentation de l'usure en dépouille (Vb) en fonction de temps d'usinage pour: (a) Vc=450 m/min; (b) Vc=600 m/min and (c) Vc=750 m/min*

La **figure III. 17** exprime la morphologie de l'usure en dépouille (*Vb)* du nitrure de bore cubique à une vitesse de coupe de 600 m/min, avec l'avance *f* = 0.08mm/tr et profondeur de passe *Doc* = 0.2mm. Au début, l'usure en dépouille (*Vb*) se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps. On remarque que, après 4 minutes de l'usinage l'usure (*Vb*) se développe est prend la valeur 0.05mm. Après 12 minutes d'usinage, on observe une arête rapportée sur la surface de l'outil, à 18 min de travail la valeur de *Vb* atteindre la valeur admissible de l'usure. La température a un effet remarquable dans la zone de l'usure.

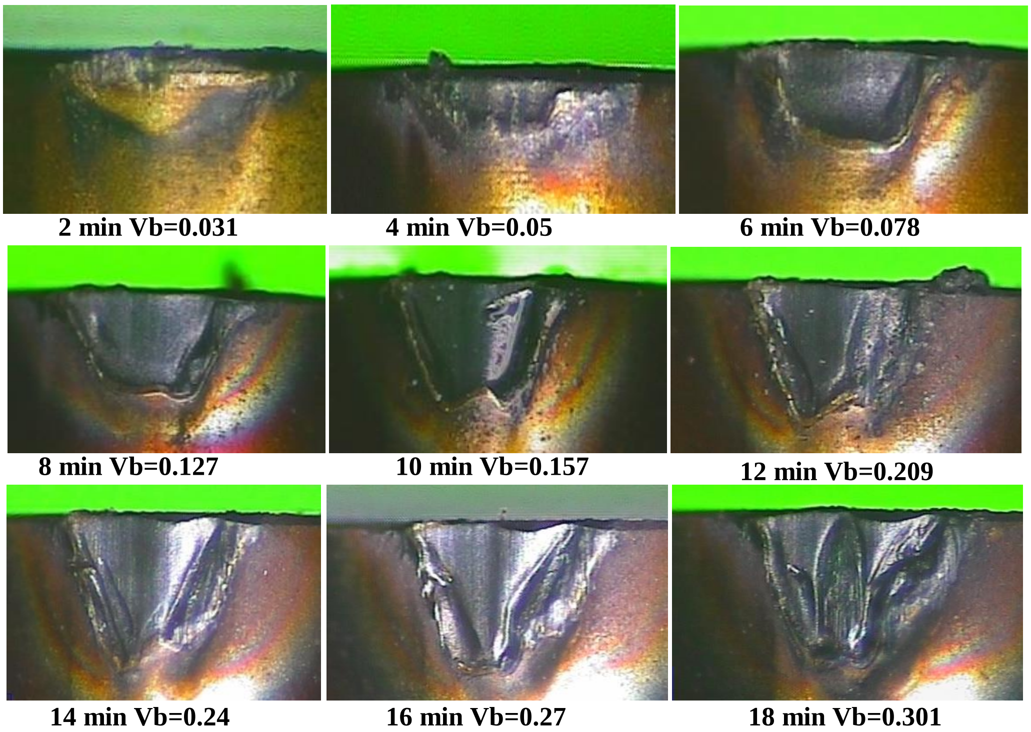


Figure III. 17 *Valeurs de l'usure en dépouille (Vb) en fonction du temps d'usinage pour Vc = 600 m/min, f = 0.08 mm/tr et Doc = 0.2 mm.*

III.4.2 Evolution des efforts de coupe en fonction d'usure

La **figure III. 18** présente l'évolution des efforts de coupe en fonction d'usure en dépouille. Il est clair d'après la figure que les trois composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction d'usure en dépouille de l'outil CBN. La principale cause de cette augmentation est l'accroissement de la surface de contact entre l'outil et la pièce ce qui a pour effet d'augmenter les forces de frottement et par conséquent, les trois composantes de l'effort de coupe. L'analyse des résultats montre que les courbes sont divisées en trois zones. Dans la zone I, l'usure (*Vb*)

varie de 0.031 à 0.078 mm, les trois composantes de l'effort de coupe varies de (24.56 à 42.94 N) pour *Fx*, (58.92 à 107.62 N) pour *Fy* et (37.84 à 46.98 N) pour *Fz*, donc on enregistre une augmentation de (74.83%, 82.65%, 24.15%) pour (*Fx, Fy* et *Fz*) successivement. Dans la zone II, (*Vb*) varie de 0.078 à 0.209 mm, on observe une stabilité des courbes comparativement à la zone I, les deux composantes (*Fy et Fz*) prend les valeurs (130.94 N et 52.65 N) avec une augmentation de (21.66% et 12.06%) respectivement, avec légère diminution de *Fx* (37.75 N) de 12.07%. Dans la zone III, l'usure (*Vb*) varie de 0.209 à 0.32 mm, les trois composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) augmentent de (106.17%, 197.54%, 46.41%) respectivement et prend les valeurs (389.61N, 77.09N et 77.83N). En fin, on enregistre une augmentation totale de (216.89, 561.25 et 103.72) % de (*Fx, Fy* et *Fz*) respectivement lorsque l'usure en dépouille (*Vb*) varie entre 0.031 à 0.32 mm. La composante de l'effort de coupe *Fy* est plus sensible pour l'augmentation de l'usure en dépouille.

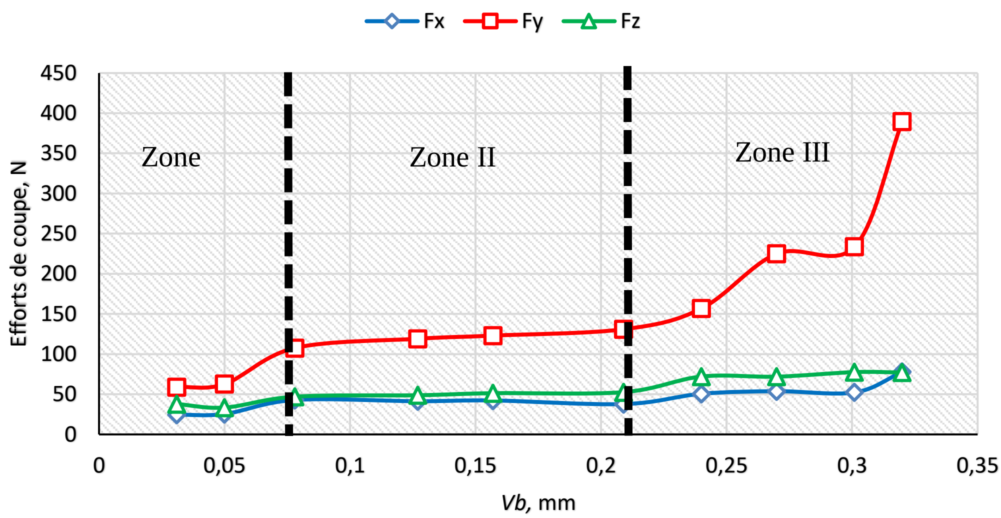


Figure III. 18 *Evolution des efforts de coupe en fonction d'usure à Vc= 600 m/min, f=0,08mm/tr, Doc=0,2mm.*

III.4.3 Evolution de la rugosité en fonction d'usure

La **figure III. 19** présente l'évolution des trois critères de rugosité (*Ra*, *Rt* et *Rz*) en fonction du l'usure en dépouille (*Vb*) à *f* = 0.08mm/tr, *Doc* = 0.2mm et *Vc* = 600 m/min. La figure montre que toutes les courbes tiennent une allure ascendante ce qui signifie que l'usure et le temps d'usinage ont des effets importants sur l'évolution des critères de rugosité. Lorsque l'usure varie de 0.031 à 0.32 mm, les critères de rugosité (*Ra, Rt, Rz*) passent de (0.54, 5.67 et 3.51) µm à (1.74, 10.48 et 9.38) µm, soit une variation qui correspond à une augmentation de (222.22, 84.83 et 167.23) %. Pour une usure admissible [*VB*] = 0.3mm, les trois critères de

rugosité *(Ra, Rt, Rz*) prennent respectivement les valeurs de (1.47, 9.24 et 8.11) µm. Il est bien clair que la rugosité (*Ra*) n'a pas dépassé la valeur de 1.5 µm durant toute la période utile d'usinage.

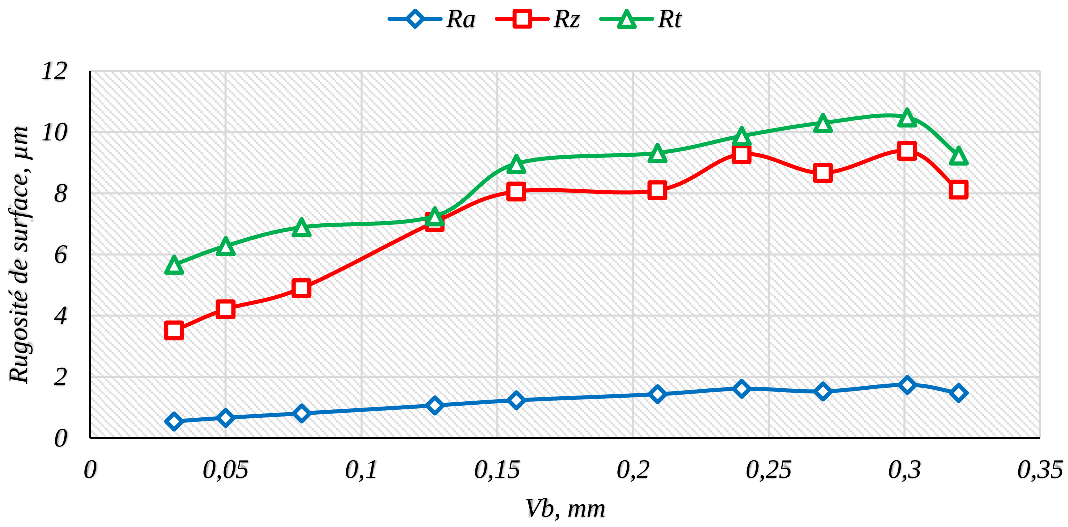


Figure III. 19 *Evolution de la rugosité en fonction du l'usure en dépouille à Vc = 600 m/min, f = 0.08 mm/tr, Doc = 0.2mm.*

III.4.4 Evolution de la température en fonction de l'usure

La **figure III.20** illustre l'évolution de la température en fonction de l'usure en dépouille (*Vb*) à *Vc* = 600 m/min, *f* = 0.08mm/tr et *Doc* = 0.2mm. On remarque que la température augmente avec l'évolution de l'usure. La température de coupe est parmi les phénomènes indésirables lors de l'usinage. L'analyse des résultats de la **figure III.20** montre que lorsque la l'usure (*Vb*) passe de 0.031 à 0.209 mm, la température enregistrée passe de la valeur 37.9 C° à 149.5 C° ce qui correspond à une augmentation de 294.45%. Ce phénomène peut être expliqué par l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce usinée ce qui favorise l'augmentation des frottements et aussi les efforts de coupe. Au-delà de la valeur de (*Vb*)=0.24 mm, on remarque une stabilité de la température à des valeurs élevés (≈160 C°). En fin on enregistre une augmentation totale de 327.44 % lorsque (*Vb*) passe de 0.031 à 0.32 mm.

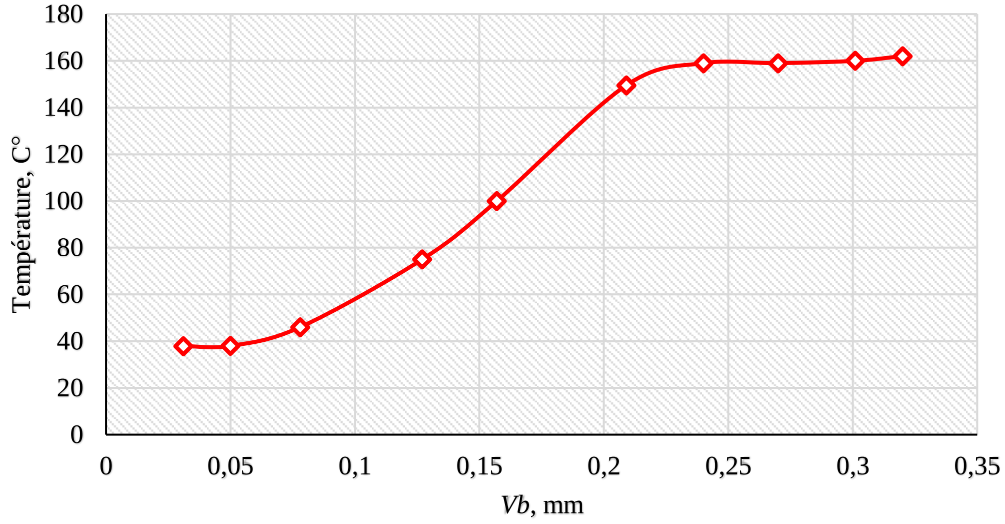


Figure III. 20 *Evolution de la température de coupe en fonction du l'usure en dépouille à Vc = 600 m/min, f = 0.08 mm/tr, Doc = 0.2mm.*

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été réalisé pour étudier l'usinabilité de la fonte grise EN-GJL-250 avec l'outil en nitrure de bore cubique CBN7050 avec revêtement PVD. Les essais paramétriques nous ont permis d'évaluer les performances du couple outil/matière en termes d'effort de coupe, de pression de coupe, de rugosité des surfaces usinées et d'usure en dépouille. Le chapitre IV qui suit, sera consacré à une étude de modélisation basée sur la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels afin de proposer des modèles mathématiques de prédiction.

Chapitre IV

Analyse statistique et prédiction des paramètres technologiques

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques du processus de tournage (chariotage) lors de l'usinage de la fonte grise EN-GJL-250 avec un outil en CBN7050. Les modèles mathématiques de prédiction trouvés permettent d'exprimer les relations entre les paramètres du régime de coupe *(Vc, f et Doc)* et les paramètres technologiques étudiés (effort de coupe, rugosité de surface, puissance de coupe). La méthode de la surface de réponse (*MSR*) a été utilisée associée à l'analyse de la variance (*ANOVA*) afin de déterminer l'influence de chaque paramètre d'usinage sur les paramètres technologiques et de proposer des modèles de prédiction. Une deuxième méthode de modélisation, qui est la méthode de réseaux de neurones artificiels (*RNA*) a été aussi adoptée pour déterminer autre forme de modèles mathématiques ainsi que la méthode du système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) a été adoptée pour déterminer les valeurs prédites de (*Fz* et *Ra*). En dernier lieu, nous avons terminé ce chapitre par une comparaison entre les modèles obtenus par les méthodes (*MSR*, *RNA* et *ANFIS*).

IV.2 Analyse statistique et modélisation par la méthode (*MSR*)

Pour déterminer l'effet de chaque paramètre de coupe telles que (*Vc, f,* et *Doc*) sur les différents paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort de coupe, rugosité de surface et puissance de coupe), nous avons adopté le plan de Taguchi (L_{27}) qui offre 27 essais. Le traitement des résultats expérimentaux du plan de Taguchi (L_{27}) nous permettra de quantifier la relation entre les différents paramètres de performance étudiés et les paramètres du régime de coupe (*Vc*, *f,* et *Doc*). Aussi, le traitement permet de déterminer les modèles mathématiques statistiques.

IV.2.1 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) permet d'interpréter et classer les résultats expérimentaux pour les paramètres d'entrée (*Vc, f* et *Doc*) selon leurs influences significatives sur les paramètres de sortie (les efforts de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe). L'ANOVA a été réalisée pour un niveau de signification (α) de 0.05 (niveau de confiance de 95%). La signification statistique pour la réponse considérée est prise en compte lorsque la valeur de la probabilité *P* du tableau ANOVA est inférieure à (α) **[86-87]**.

Les cases *P*-value, la somme des carrés (*SC*), la moyenne des carrés (*MC*), *F*-value et la contribution dans le tableau d'ANOVA sont définies comme suit :

- En première colonne figurent les sommes des carrés (SC) par rapport aux moyennes sont calculées par l'équation IV.1

$$SC_{\mathrm{f}} = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\overline{y_i} - \overline{y})^2 \qquad \text{(IV.1)}$$

Où, $\bar{y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i$ la moyenne des réponses, $\overline{y_i}$ la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau i^{ème}, N nombre total d'expériences, N_{nf} niveau de chaque facteur f.

- En deuxième colonne figurent les degrés de liberté *(dl)* utilisés pour calculer la valeur F.
- La troisième colonne carrés moyens (MC) est calculée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté

$$\text{MCi} = \frac{SS_i}{df_i}. \quad \text{(IV.2)}$$

- La quatrième colonne *F-value* est calculée par l'équation (IV.3)

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad \text{(IV.3)}$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

- La colonne *de P-value* est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0{,}05$, le paramètre est insignifiant

- Si $P < 0{,}05$, le paramètre est signifiant

- La dernière colonne du tableau d'ANOVA (*Cont. %*), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad \text{(IV.4)}$$

IV.2.2 Méthodologie de surface de réponse (*MSR*)

La méthodologie de la surface de réponse (*MSR*) a été adoptée pour la modélisation mathématique des paramètres de sortie à l'aide du logiciel statistique Miniab 18. Les objectifs de cette méthode sont de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. La méthode de surface de réponse (*MSR*) est une procédure qui comprend six étapes :

- Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie souhaitées ;
- Choisir un plan de conception expérimentale ;
- Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique de (*MSR*) ;
- Analyser par (*ANOVA*) les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- Déterminer la forme du modèle mathématique approprié ;
- Optimiser les paramètres d'entrée et effectuer les tests de confirmation pour vérifier les performances prédites.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet, d'une part, de modéliser une variable dépendante dite, appelée variable réponse, en fonction d'un certain nombre de variables

indépendantes (facteurs), X_1, X_2,..., X_k, d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y_i) sous la forme suivante :

$$Yi = a_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i X_i + \sum_{i=1}^{k} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^{k} a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad \text{(IV. 5)}$$

- Y_i est la quantité à laquelle l'expérimentateur s'intéresse. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérience et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- Xi représente le niveau attribué au facteur i. C'est la valeur de la coordonnée du facteur i choisie par l'expérimentateur pour réaliser un test. Cette valeur est parfaitement connue. Nous supposerons même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse de régression classique) ;
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, les termes représentant les interactions entre variables et les termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (IV-2).

$$R^2 = \frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}{\sum(\bar{Y}_i - \bar{Y})^2} \qquad \text{(IV. 6)}$$

avec Yi: valeur de la réponse calculée à la i^e expérience ;

$\bar{Y}_i$: valeur mesurée à la i^e expérience ;

Y: valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de la variance (*ANOVA*) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. L'*ANOVA* permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (*Fx*, *Fy, Fz, Ra, Rz, Rt et Pc*).

IV.3 Résultats expérimentaux

Le **tableau IV.1** présente les résultats expérimentaux correspondants aux efforts de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*), les critères de la rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*), la productivité et la puissance de coupe avec les différentes combinaisons des paramètres de coupe, (*Vc*, *f* et *Doc*) suivant le plan d'expérience Taguchi L_{27}. L'analyse des résultats montre que les efforts de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) varie dans les intervalles (9.92 - 77.08) N, (23.60 -146.86) N et (29.47 - 172.32) N respectivement. Pour les critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) ils varient dans les intervalles de (0.7 – 3.03) µm, (5.43 – 15.75) µm et

(7.28 – 18.98) µm respectivement. Les résultats de *Pc* varient entre (208.25-1434.52) W. La puissance de coupe (*Pc*) est calculée selon l'équation (IV.7):

$$Pc = \frac{Vc * f}{60} \ (W) \quad \text{(IV.7)}$$

Tableau IV. 1 *Résultats des expériences suivant le plan de Taguchi L_{27}.*

Vc (m/min)	*f* (mm/tr)	*Doc* (mm)	*Fx* (N)	*Fy* (N)	*Fz* (N)	*Ra* (µm)	*Rz* (µm)	*Rt* (µm)	*Pc* (*W*)
273	0.08	0.3	15.55	41.79	45.77	1.35	8.35	10.36	208.25
		0.6	28.53	57.13	55.87	1.32	7.67	10.42	254.21
		0.9	70.96	85.8	90.38	1.28	7.73	10.92	411.23
	0.14	0.3	18.13	46.59	48.87	2.64	12.97	14.16	222.36
		0.6	48.42	102.98	69.35	2.38	12.22	13.37	315.54
		0.9	75.86	126.13	133.93	2.37	12.25	13.38	609.38
	0.20	0.3	25.15	73.54	68.01	3.03	15.75	18.23	309.45
		0.6	51.46	112.08	134.71	2.68	14.82	18.98	612.93
		0.9	77.08	146.86	172.32	2.79	15.55	18.7	784.06
382	0.08	0.3	11.37	34.9	34.43	1.04	6.76	8.42	219.20
		0.6	23.84	52.36	49.12	1.06	6.83	8.45	312.73
		0.9	53.08	72.31	81.24	1.06	7.08	8.62	517.23
	0.14	0.3	16.23	36.99	47.22	1.57	8.20	11.39	300.63
		0.6	39.68	93.95	57.6	1.57	8.69	11.57	366.72
		0.9	71.92	111.68	128.11	1.61	8.99	12.03	815.63
	0.20	0.3	21.4	65.98	57.61	2.10	12.82	13.02	366.78
		0.6	37.92	109.7	125.92	2.15	12.80	13.12	801.69
		0.9	73.96	134.46	162.72	2.17	12.83	13.20	1035.98
546	0.08	0.3	9.92	23.6	29.47	0.70	5.43	7.28	268.18
		0.6	20.74	45.73	42.80	0.81	5.67	7.28	389.48
		0.9	47.71	62.39	77	0.79	5.78	7.32	700.70
	0.14	0.3	14.88	30.07	44.09	1.16	6.96	8.27	401.22
		0.6	32.87	87.16	51.43	1.20	7.08	8.71	468.01
		0.9	49.21	108.88	125.7	1.38	7.19	8.75	1143.87
	0.20	0.3	21.61	56.71	52.95	2.05	11.30	12.22	481.85

0.6	35.79	102.79	115.51	2.04	11.31	12.33	1051.14
0.9	67.89	129.32	157.64	2.05	11.33	12.52	1434.52

IV.4 Traitement des résultats par la méthode MSR

IV.4.1 ANOVA et modélisation pour les efforts de coupe *(Fx, Fy* et *Fz)*

a) ANOVA pour les efforts de coupe

Les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4 présentent l'analyse *ANOVA* pour les efforts de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*).

L'*ANOVA* de l'effort (*Fx*) (tableau IV.2) montre que la profondeur de passe (*Doc*) est le facteur le plus dominant suivi par l'avance (*f*) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (*Vc*), on enregistre des contributions successivement de (79.15, 7.432 et 5.29) %. En remarque aussi que les termes (*Vc×Doc*) et (Doc^2) ont un impact significatif avec des contributions faibles de 1.465% et 1.546% successivement. Par contre les termes restants, n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0.05.

Tableau IV. 2 *ANOVA pour l'effort de coupe (Fx)*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	12507.620	9	1389.736	77.676	0.000000	97.626	Significant
Vc	678.593	1	678.593	37.929	0.000011	5.297	Significant
f	952.172	1	952.172	53.220	0.000001	7.432	Significant
Doc	10141.647	1	10141.647	566.846	0.000000	79.159	Significant
Vc×f	5.228	1	5.228	0.292	0.595829	0.041	
Vc×Doc	187.663	1	187.663	10.489	0.004828	1.465	Significant
f ×Doc	20.962	1	20.962	1.172	0.294186	0.164	
Vc^2	22.672	1	22.672	1.267	0.275931	0.177	
f^2	30.285	1	30.285	1.693	0.210602	0.236	
Doc^2	198.030	1	198.030	11.068	0.003991	1.546	Significant
Residual	304.153	17	17.891				
CorTotal	12811.773	26					

Le **tableau IV.3**, illustre l'*ANOVA* pour l'effort (*Fy*), on peut remarquer que les conditions de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*) ont un effet significatif sur l'effort (*Fy*) avec des contributions de (3.62, 35.02 et

54.09) % respectivement. Les interactions (*f* ×*Doc*) et (Doc^2) ont aussi un faible effet sur (*Fy*) puisque leurs contributions sont (2.25% et 1.10%) successivement. Par contre les interactions (*Vc*×*f*) et (*Vc*×*Doc*) n'ont pas un effet puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0.05. Donc on peut dire que la profondeur de passe (*Doc*) est le facteur le plus dominant sur l'effort (*Fy*) suivi par l'avance (*f*).

Tableau IV. 3 *ANOVA pour l'effort de coupe (Fy).*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	31851.103	9	3539.011	62.385	0.000	97.061	Significant
Vc	1188.281	1	1188.281	20.947	0.000	3.621	Significant
f	11494.699	1	11494.699	202.627	0.000	35.028	Significant
Doc	17752.790	1	17752.790	312.944	0.000	54.099	Significant
Vc×*f*	7.561	1	7.561	0.133	0.720	0.023	
Vc×*Doc*	1.990	1	1.990	0.035	0.854	0.006	
f ×*Doc*	739.470	1	739.470	13.035	0.002	2.253	Significant
Vc^2	35.945	1	35.945	0.634	0.437	0.110	
f^2	122.733	1	122.733	2.164	0.160	0.374	
Doc^2	361.720	1	361.720	6.376	0.022	1.102	Significant
Residual	964.382	17	56.728				
CorTotal	32815.485	26					

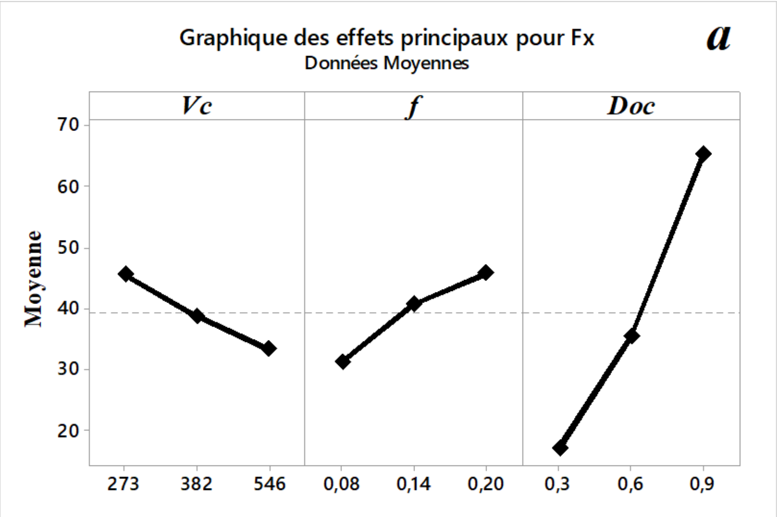
Le **tableau IV.4** présente l'*ANOVA* pour l'effort (*Fz*). On constate que (*Vc, f* et *Doc*) ont un impact significatif, on enregistre des contributions successivement de (1.68, 32.47 et 54.53) %. Aussi l'interaction (*f* ×*Doc*) a un impact significatif sur (*Fz*) avec une contribution de 5.15%, par contre les autres termes restants n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est plus grande que 0.05. Il est clair que le facteur (*Doc*) est le plus dominant car sa contribution est 54.53%, il est suivi par l'avance (*f*). Les résultats trouvés dans cette analyse statistique sont en parfaite concordance avec d'autres recherches sur l'effet des conditions de coupe sur les efforts de coupe. **[88] et [89]** reportent que la profondeur de passe est le facteur prépondérant sur les composantes de l'effort de coupe suivie par l'avance par tour.

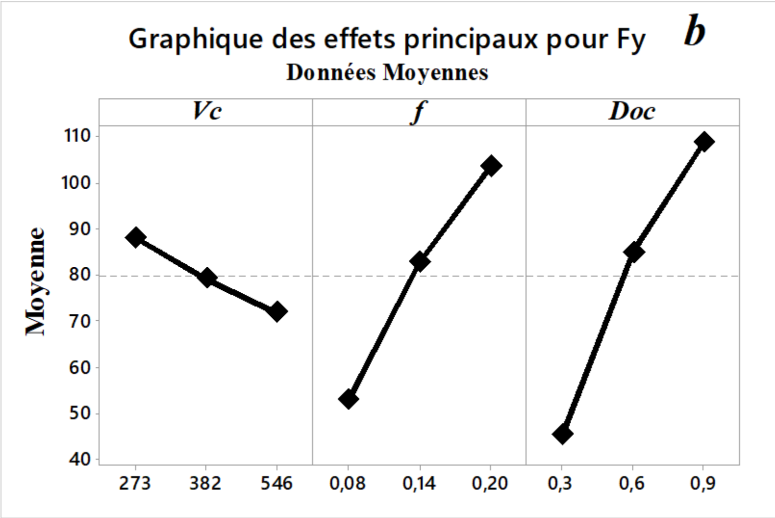
***Tableau IV. 4** ANOVA pour l'effort de coupe (Fz)*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	47759.05	9	5306.56	46.96	0.000000	96.13	Significant
Vc	835.31	1	835.31	7.39	0.014589	1.68	Significant
f	16132.81	1	16132.81	142.77	0.000000	32.47	Significant
Doc	27089.64	1	27089.64	239.73	0.000000	54.53	Significant
$Vc \times f$	3.36	1	3.36	0.03	0.865057	0.01	
$Vc \times Doc$	0.00	1	0.00	0.00	0.999938	0.00	
$f \times Doc$	2556.75	1	2556.75	22.63	0.000183	5.15	Significant
Vc^2	50.48	1	50.48	0.45	0.512859	0.10	
f^2	367.49	1	367.49	3.25	0.089086	0.74	
Doc^2	432.59	1	432.59	3.83	0.067029	0.87	
Residual	1921.02	17	113.00				
Cor Total	49680.07	26					

b) Graphes des effets principaux

Les graphes de la **figure IV.1** (a, b, et c) présentent les effets principaux entre les diffèrent paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*) et les efforts de coupes (*Fx*, *Fy* et *Fz*). L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe (*Doc*) a la plus grande pente, ceci montre qu'elle affecte fortement les trois composantes de l'effort de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*), elle est suivie par l'avance (*f*). Donc (*Doc*) et (*f*) ont des effets croissants sur (*Fx*, *Fy* et *Fz*) respectivement, mais la vitesse de coupe (*Vc*) a un effet très faible sur les trois composantes de l'effort.





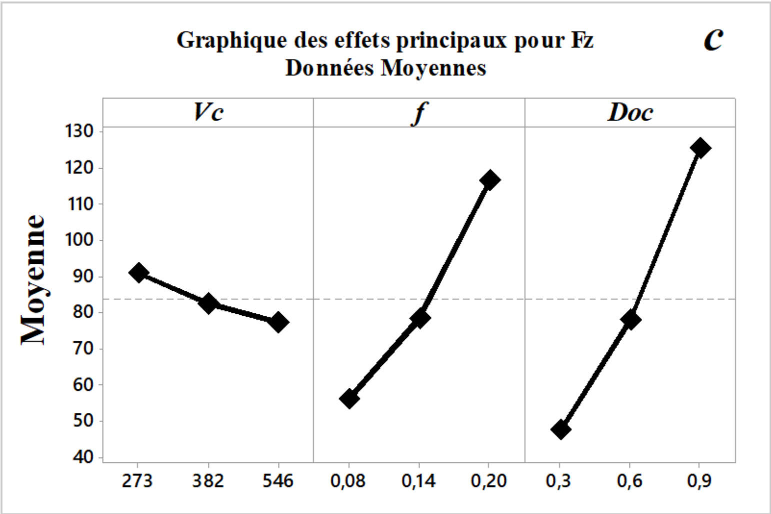


Figure IV. 1 (a, b et c) *Graphes des effets principaux pour (Fx, Fy et Fz).*

c) Modèles de régression

Le traitement statistique des résultats nous a permis de proposer des modèles mathématiques de régression qui lient les variables indépendantes appelées les conditions de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*) et les paramètres de sortie (*Fx*, *Fy* et *Fz*).

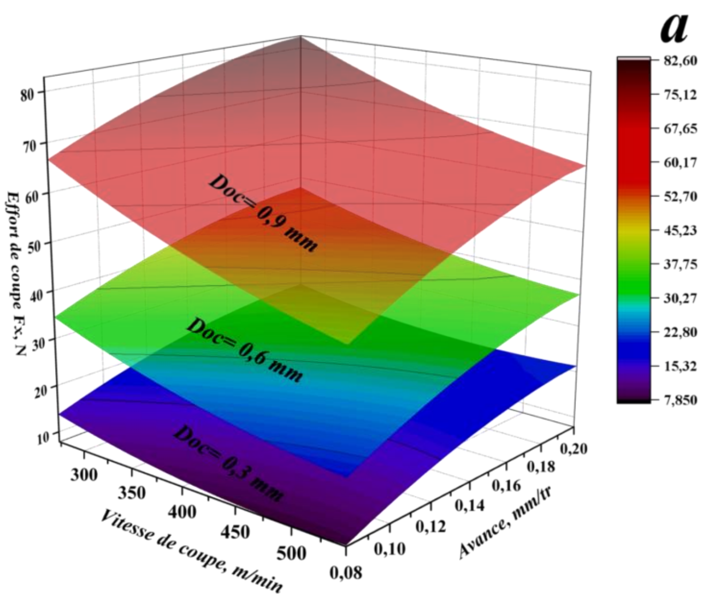
Les modèles complets avec leurs coefficients de corrélation de (*Fx*, *Fy* et *Fz*) en fonction de (*Vc*, *f* et *Doc*) sont présentés dans les équations (IV-8), (IV-9) et (IV-10) respectivement. Pour la validité du modèle, si le coefficient de détermination (R^2) approche à la valeur de l'unité (1), donc le modèle est compatible avec les valeurs expérimentales.

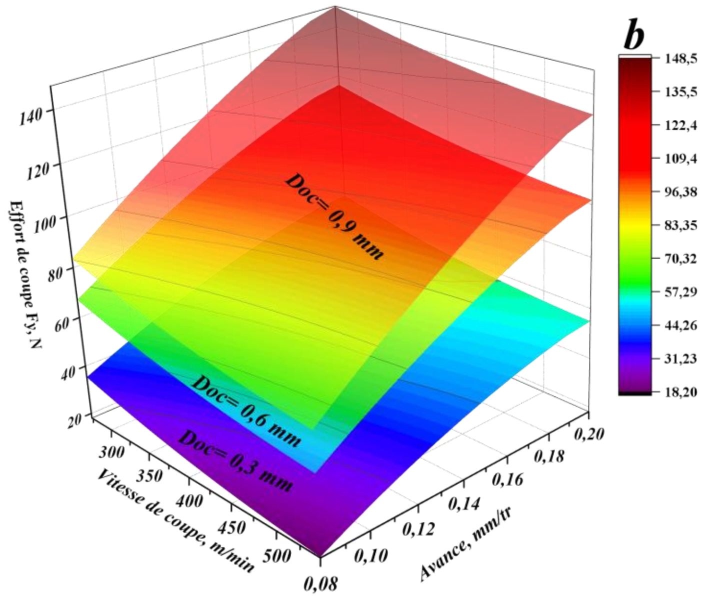
$$\boldsymbol{Fx} = 5.22658 - 0.088296 * \text{Vc} + 219.52702 * f + 31.78669 * \text{Doc} + 0.080051 * \text{Vc} * f - 0.095924 * \text{Vc} * \text{Doc} + 73.42593 * f * \text{Doc} + 1.09476 * \text{e}^{-004} * \text{Vc}^2 - 624.07407 * f^2 + 63.83333 * \text{Doc}^2 \quad (\mathbf{R^2 = 97.63\%}) \qquad \text{(IV.8)}$$

$$\boldsymbol{Fy} = -5.04723 - 0.17997 * \text{Vc} + 473.25771 * f + 151.54678 * \text{Doc} + 0.096274 * \text{Vc} * f - 9.87724\text{e}^{-003} * \text{Vc} * \text{Doc} + 436.11111 * f * \text{Doc} + 1.37846\text{e}^{-004} * \text{Vc}^2 - 1256.32716 * f^2 - 86.27160 \quad (\mathbf{R^2 = 97.06\%}) \qquad \text{(IV.9)}$$

$$\boldsymbol{Fz} = 111.19385 - 0.17470 * \text{Vc} - 568.33380 * f - 96.99764 * \text{Doc} - 0.064212 * \text{Vc} * f - 5.88377\text{e}^{-006} * \text{Vc} * \text{Doc} + 810.92593 * f * \text{Doc} + 1.63359\text{e}^{-004} * \text{Vc}^2 + 2173.91975 * f^2 + 94.34568 * \text{Doc}^2 \quad (\mathbf{R^2 = 96.13\%}) \qquad \text{(IV.10)}$$

La **figure IV.2** illustre les courbes 3D de la surface de réponse et les graphes de contour des composantes de l'effort de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*) dans différents plans. Les courbes 3D montrent l'effet de (*Vc*, *f* et *Doc*) sur les efforts (*Fx*, *Fy* et *Fz*). Dans chaque graphe de la surface de réponse 3D, les sommets représentent les interactions des deux paramètres considérés. Il est clairement observé que la profondeur de passe affecte fortement les trois efforts, suivie par l'avance (*f*). La vitesse de coupe a un effet moins important et décroissant. En effet, les trois efforts de coupe sont diminués par l'augmentation de la vitesse de coupe.





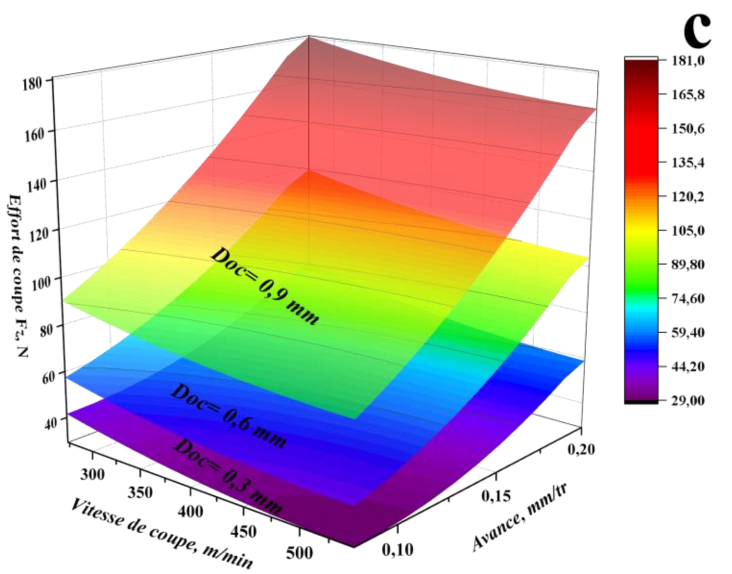


Figure IV. 2 (a, b et c) *Courbes 3D de (Fx, Fy et Fz) en fonction de (Vc, f et Doc) obtenues par les modèles MSR.*

Les graphes de contour permettent d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Les graphes de contour ressemblent à la forme du profil curviligne selon les modèles de régression quadratique. Il ressort de ces figures que, si l'avance (*f*) et (*Doc*) prend des valeurs petites et si la vitesse (*Vc*) prend une valeur grande, Alors les efforts de coupe sont à leurs bas niveaux.

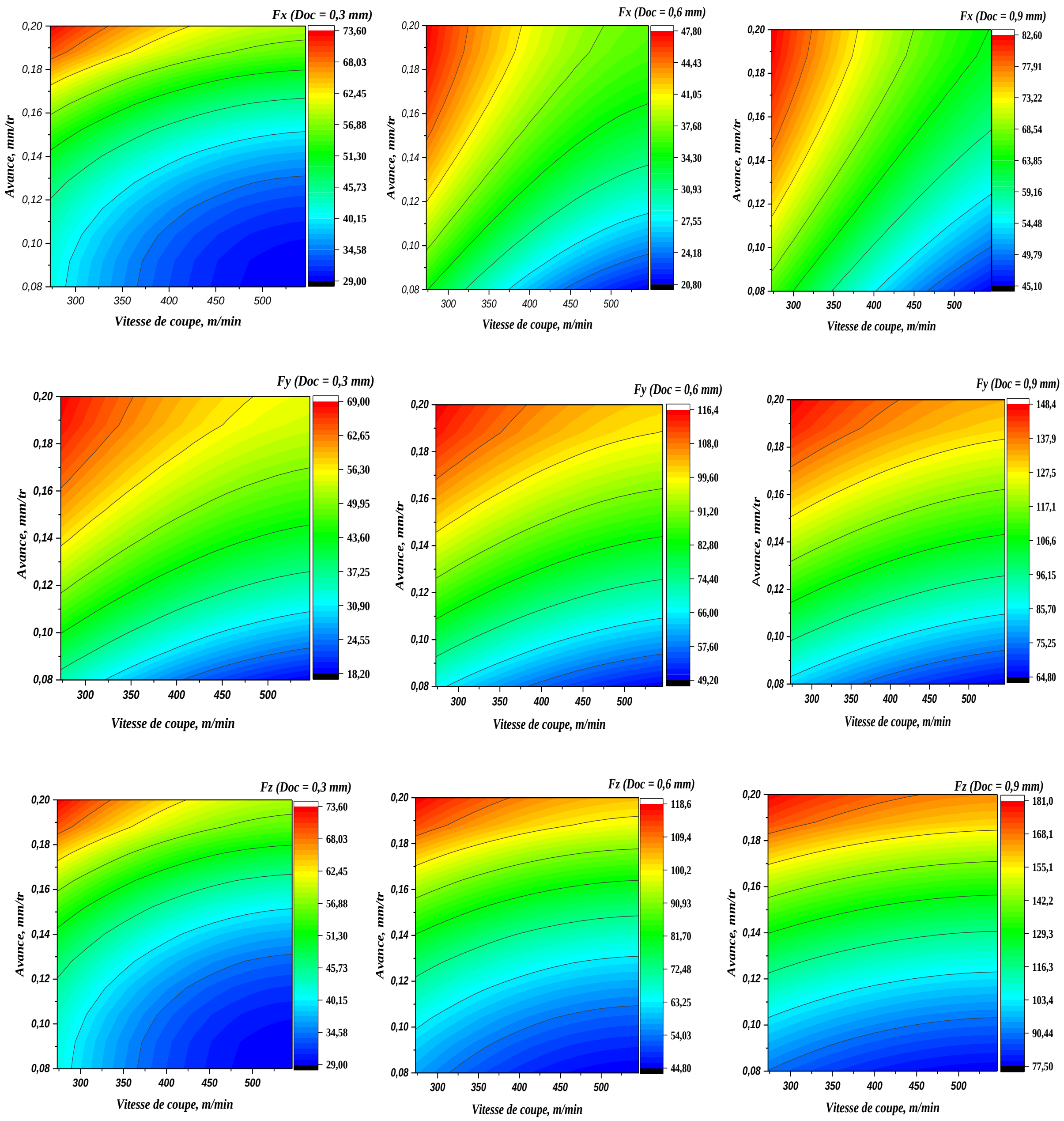


***Figure IV. 3** Graphes de contour de (Fx, Fy et Fz) en fonction de (Vc, f et* Doc*) obtenus par la méthode MSR.*

La **figure IV.4** (a, b et c) présente la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes des efforts de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*) et celles prédites par les modèles (IV-8, IV-9 et IV-10). L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches, ce qui veut dire, que les équations proposées représentent d'une manière satisfaisante le phénomène étudié.

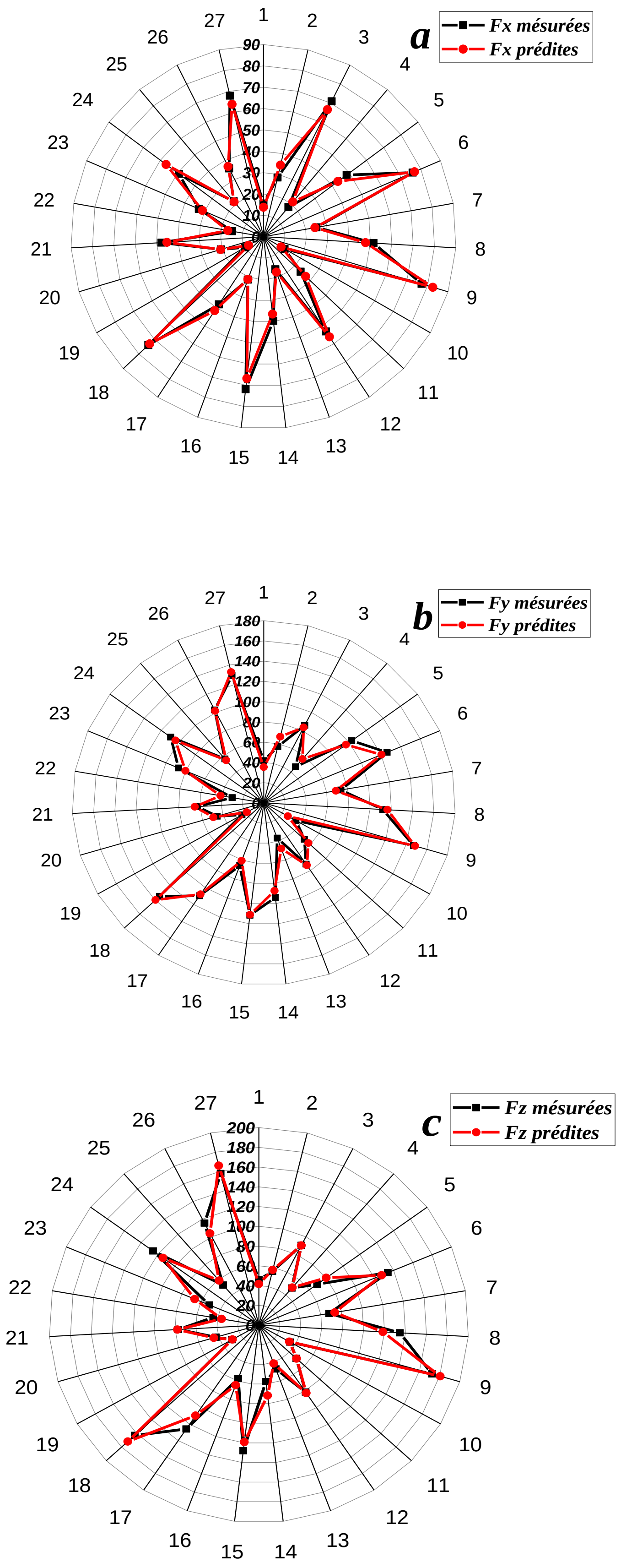


Figure IV. 4 (a, b et c). *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Fx, Fy et Fz).*

IV.4.2 ANOVA et Modélisation pour (*Ra, Rz* et *Rt*)

a) ANOVA pour (*Ra, Rz* et *Rt*)

Les tableaux IV.5, IV.6 et IV.7 présentent l'ANOVA pour les critères de la rugosité de surface (*Ra, Rz* et *Rt*). On s'aperçoit rapidement que l'avance est le principal facteur influençant la rugosité de surface de la fonte grise EN-JGL-250. D'après le tableau IV.5, les deux paramètres de coupe (*Vc* et *f*) ont un effet significatif sur (*Ra*) avec des contributions successivement de (27.97 et 63.64) %. Le terme carré (Vc^2) a aussi une influence sur le facteur (*Ra*) avec une contribution de 3.77%, par contre la profondeur de passe (*Doc*) et les interactions (*Vc*× *f*), (*Vc*×*Doc*) et (*f*×*Doc*) ainsi que les termes carrés, n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0.05.

Tableau IV. 5 *ANOVA pour le critère de la rugosité (Ra).*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	*11.1422463*	*9*	*1.24*	*41.21*	*0.00000*	*95.62*	*Significant*
Vc	*3.25975556*	*1*	*3.26*	*108.50*	*0.00000*	*27.97*	*Significant*
f	*7.41564441*	*1*	*7.42*	*246.82*	*0.00000*	*63.64*	*Significant*
Doc	*1.67E-04*	*1*	*0.00*	*0.01*	*0.94136*	*0.00*	
Vc×f	*2.81E-02*	*1*	*0.03*	*0.93*	*0.34720*	*0.24*	
Vc×Doc	*0.06002233*	*1*	*0.06*	*2.00*	*0.17558*	*0.52*	
f×Doc	*3.67E-03*	*1*	*0.00*	*0.12*	*0.73083*	*0.03*	
Vc^2	*0.43927173*	*1*	*0.44*	*14.62*	*0.00136*	*3.77*	*Significant*
f^2	*0.03081667*	*1*	*0.03*	*1.03*	*0.32537*	*0.26*	
Doc^2	*9.60E-03*	*1*	*0.01*	*0.32*	*0.57928*	*0.08*	
Residual	*0.51075371*	*17*	*0.03*				
CorTotal	*11.653*	*26*					

Le tableau IV.6, montre que l'ANOVA pour le critère de la rugosité (*Rz*), on remarque que ce facteur évolue presque de la même manière que (*Ra*). On enregistre des contributions de (26.05 et 66.93) % pour (*Vc* et *f*) respectivement, ce qui signifie que (*Vc* et *f*) ont un impact significatif. L'interaction (*Vc*×*f*) et les termes carrés (Vc^2) et (f^2) sont aussi significatifs avec des faibles des contributions (0.79%, 1.87% et 0.80%) respectivement. Par contre la profondeur de passe (*Doc*) et les interactions (*Vc*×*Doc*) et (*f* ×*Doc*) n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) a dépassé la valeur 0.05.

***Tableau IV. 6** ANOVA pour le critère de la rugosité (Rz)*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	257.237378	9	28.58	61.28	0.000000	97.01	Significant
Vc	69.0704222	1	69.07	148.08	0.000000	26.05	Significant
f	177.471392	1	177.47	380.47	0.000000	66.93	Significant
Doc	0.00807534	1	0.01	0.02	0.896864	0.00	
Vc×f	2.09693059	1	2.10	4.50	0.048997	0.79	Significant
Vc×Doc	0.30852812	1	0.31	0.66	0.427298	0.12	
f×Doc	0.003675	1	0.00	0.01	0.930309	0.00	
Vc^2	4.95248103	1	4.95	10.62	0.004627	1.87	Significant
f^2	2.12415	1	2.12	4.55	0.047708	0.80	Significant
Doc^2	0.17681667	1	0.18	0.38	0.546258	0.07	
Residual	7.92968851	17	0.47				
CorTotal	265.167067	26					

D'après les résultats de l'ANOVA pour le critère de la rugosité (*Rt*) (tableau IV.7), on remarque que (*Vc*), (*f*) et les interactions ((*Vc×f*) et (Vc^2)) ont un impact significatif, on enregistre des contributions successivement de (37.32, 53.03, 1.95 et 3.20) %. Par contre la (*Doc*) et les interactions (*Vc×Doc*) et (*f×Doc*) n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0.05. On voit que l'avance (*f*) est le facteur le plus dominant car sa contribution est 53.03%. On note que l'avance (*f*) est le facteur plus dominant sur les trois critères de la rugosité de surface.

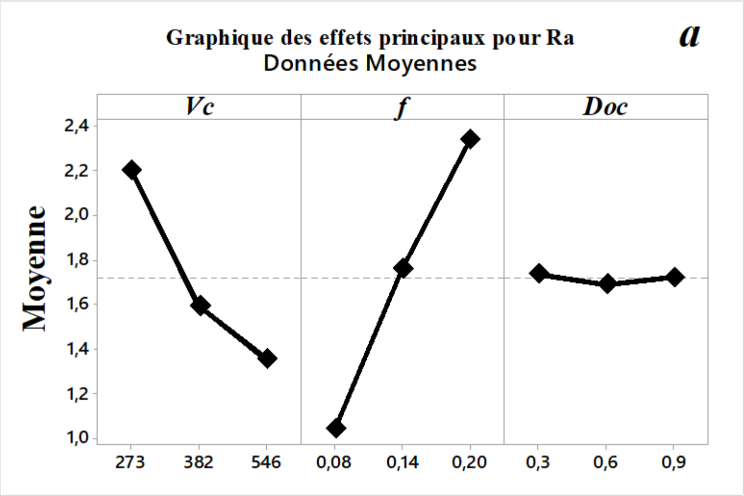
***Tableau IV. 7** ANOVA pour la rugosité (Rt)*

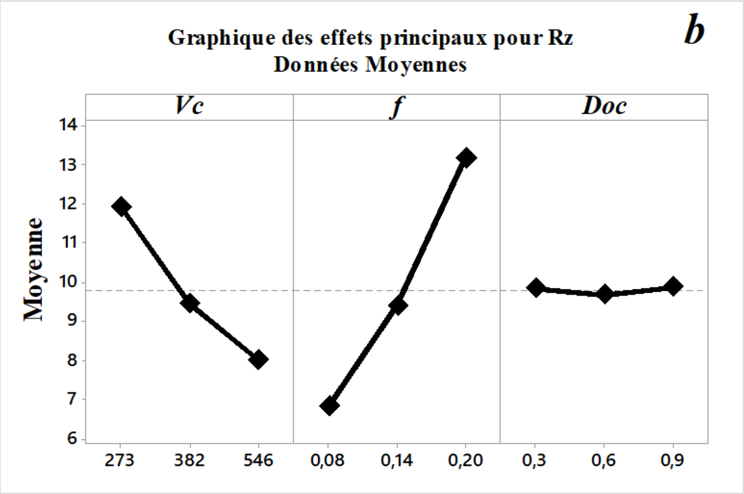
Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont.%*	
Model	274.777473	9	30.53	45.92	0.00000	96.05	Significant
Vc	106.774756	1	106.77	160.60	0.00000	37.32	Significant
f	151.713727	1	151.71	228.19	0.00000	53.03	Significant
Doc	0.25277716	1	0.25	0.38	0.54566	0.09	
Vc×f	5.57486382	1	5.57	8.39	0.01005	1.95	Significant
Vc×Doc	0.02095673	1	0.02	0.03	0.86118	0.01	
f×Doc	0.001875	1	0.00	0.00	0.95827	0.00	
Vc^2	9.16146127	1	9.16	13.78	0.00173	3.20	Significant

f^2	1.22401667	1	1.22	1.84	0.19257	0.43
Doc^2	0.00201667	1	0.00	0.00	0.95672	0.00
Residual	11.3023267	17	0.66			
CorTotal	286.0798	26				

b) Graphes des effets principaux

Les **figures IV.5** (a, b et c) illustrent les graphes des effets principaux pour les critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction des paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*). Ces graphes montrent que l'avance (*f*) a la plus grande pente, ce qui montre sa plus grande influence sur (*Ra*, *Rz* et *Rt*). Aussi, les critères (*Ra*, *Rz* et *Rt*) diminuent avec la croissance de la vitesse de coupe (*Vc*). Par contre la profondeur de passe (*Doc*) a la plus petite pente ce qui indique que son influence est presque négligeable sur la rugosité de surface pour ce cas d'étude.





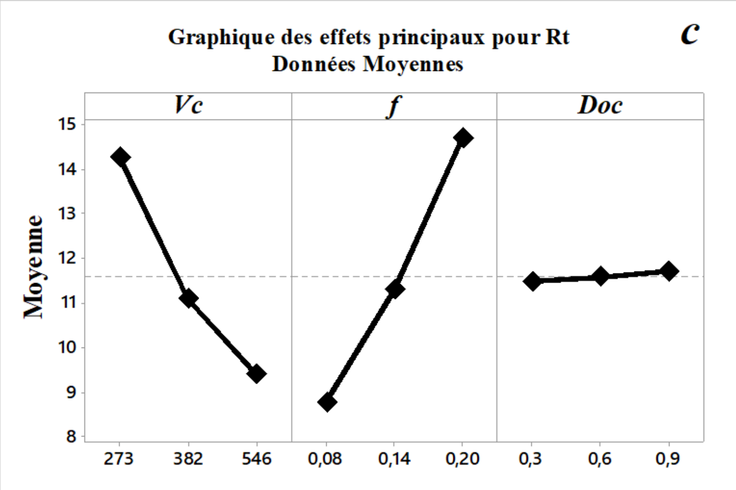


Figure IV. 5 *Graphes des effets principaux pour (Ra, Rz et Rt).*

c) Modèles de régression

Le traitement statistique des résultats trouvés a permis de trouver des modèles mathématiques complets des différents critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction de (*Vc*, *f* et *Doc*) avec les coefficients de détermination. Les modèles sont présentés dans les équations (IV-11), (IV-12) et (IV-13) respectivement :

$$\boldsymbol{Ra} = 3.62482 - 0.015806 * \mathrm{Vc} + 19.29324 * f - 1.10992 * \mathrm{Doc} - 0.0058671 * \mathrm{Vc} * f + 1.71551\mathrm{e}^{-003} * \mathrm{Vc} * \mathrm{Doc} - 0.97222 * f * \mathrm{Doc} + 1.52384\mathrm{e}^{-005} * \mathrm{Vc2} - 19.90741 * f^2 + 0.44444 * \mathrm{Doc}^2 \quad \mathbf{(R^2 = 95.62\%)} \qquad \text{(IV. 11)}$$

$$\boldsymbol{Rz} = 17.45669 - 0.051492 * \mathrm{Vc} + 27.57427 * f - 3.67466 * \mathrm{Doc} - 0.050699 * \mathrm{Vc} * f + 3.88942\mathrm{e}^{-003} * \mathrm{Vc} * \mathrm{Doc} - 0.97222 * f * \mathrm{Doc} + 5.11663\mathrm{e}^{-005} * \mathrm{Vc}^2 + 165.27778 * f^2 + 1.90741 * \mathrm{Doc}^2 \quad \mathbf{(R^2 = 97.01\%)} \qquad \text{(IV. 12)}$$

$$\boldsymbol{Rt} = 20.27701 - 0.063873 * \mathrm{Vc} + 46.85302 * f - 0.36044 * \mathrm{Doc} - 0.082666 * \mathrm{Vc} * f + 1.01368\mathrm{e}^{-003} * \mathrm{Vc} * \mathrm{Doc} + 0.69444 * f * \mathrm{Doc} + 6.95912\mathrm{e}^{-005} * \mathrm{Vc}^2 + 125.46296 * f^2 + 0.20370 * \mathrm{Doc}^2 \quad \mathbf{(R^2 = 96.05\%)} \qquad \text{(IV.13)}$$

La **figure IV.6** illustre les courbes 3D de la surface de réponse pour les critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*) en fonction de (*Vc*, *f* et *Doc*). Les résultats présentés montrent que les critères de rugosité tendent à augmenter considérablement avec l'accroissance de l'avance et diminuent avec l'augmentation de (*Vc*), par contre on remarque un léger effet de (*Doc)* sur la rugosité de surface.

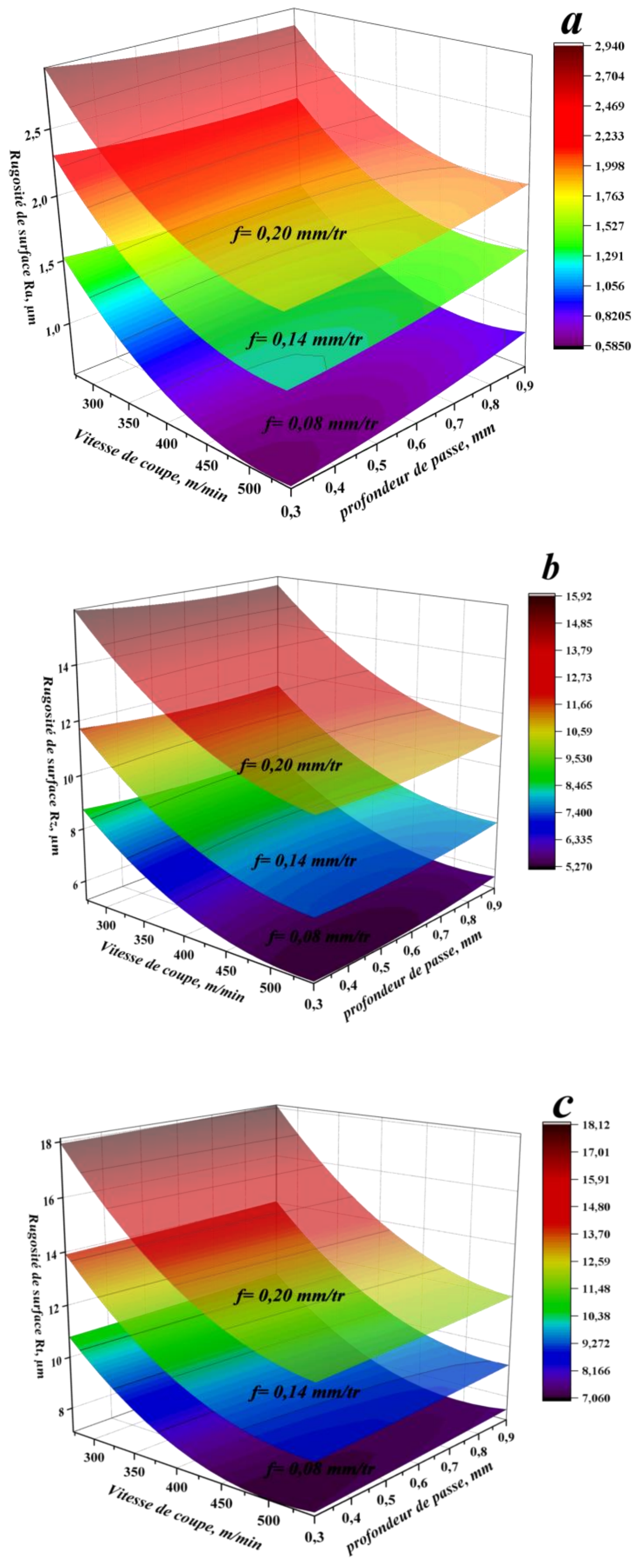


Figure IV. 6 *(a, b et c) Courbes 3D sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur (Ra, Rt et Rz) obtenues par les modèles MSR.*

Les graphes de contour de la rugosité de surface (*Ra*, *Rz* et *Rt*) correspondent à la forme d'allure curviligne selon les modèles de régression quadratique trouvés par (*MSR*). Elles confirment les résultats des tableaux ANOVA, si (*Vc*) augmente donc les trois critères de la rugosité de surface diminue, et si (*f*) devient plus grands, les critères (*Ra*, *Rz* et *Rt*) augmentent. Aussi, on remarque sur les contours que l'augmentation de (*Doc*) n'a presque pas d'effet sur (*Ra*, *Rz* et *Rt*).

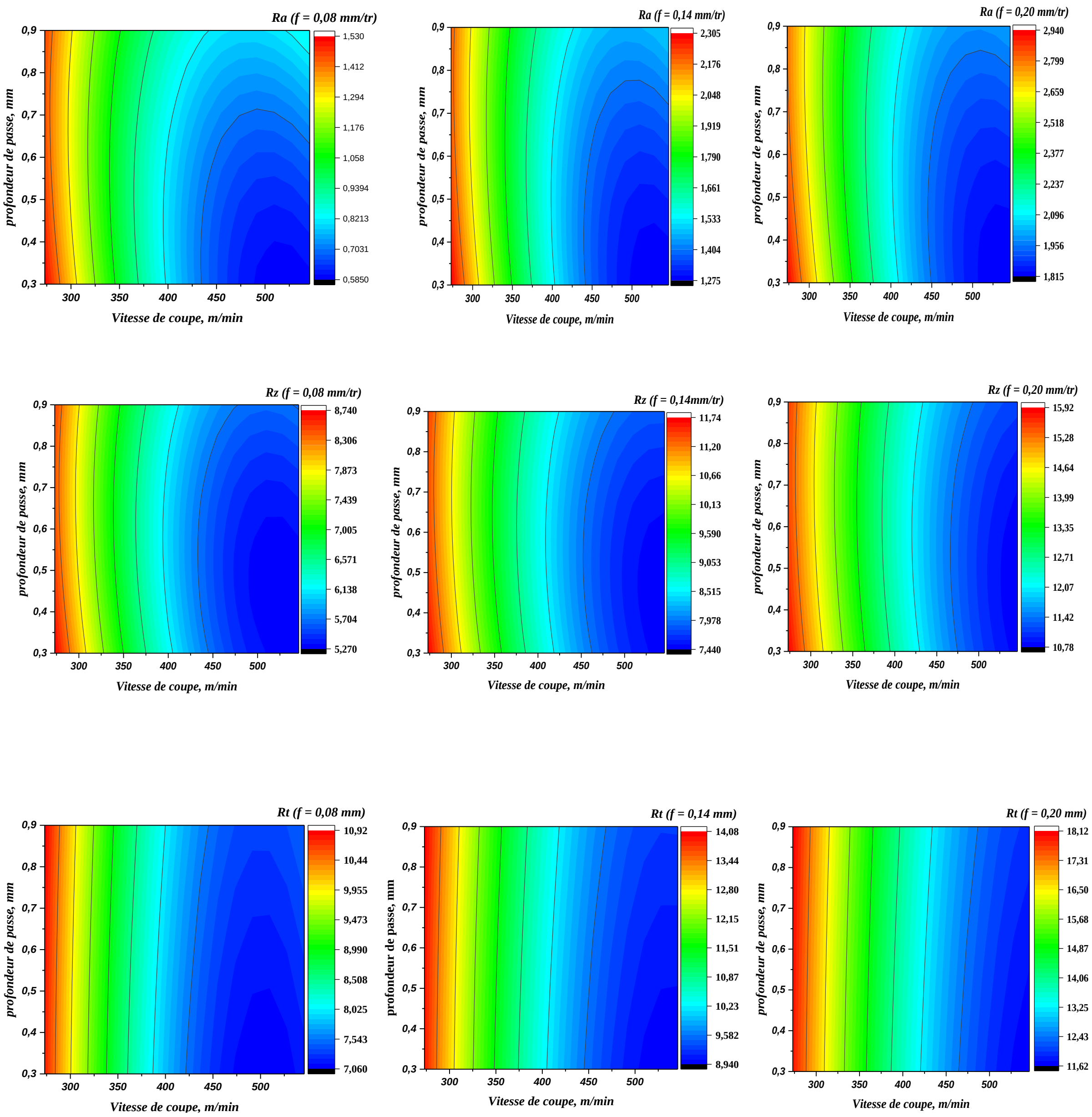


Figure IV. 7 *Graphes de contour sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur (Ra, Rt et Rz).*

La **figure IV.8 (a, b et c)** montre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par la méthode de surface de réponse (*MSR*) et les valeurs mesurées des critères de rugosité de surface (*Ra*, *Rz* et *Rt*). On remarque que les valeurs prédites des critères de rugosité de surface sont en bonne concordance avec les valeurs enregistrées expérimentalement.

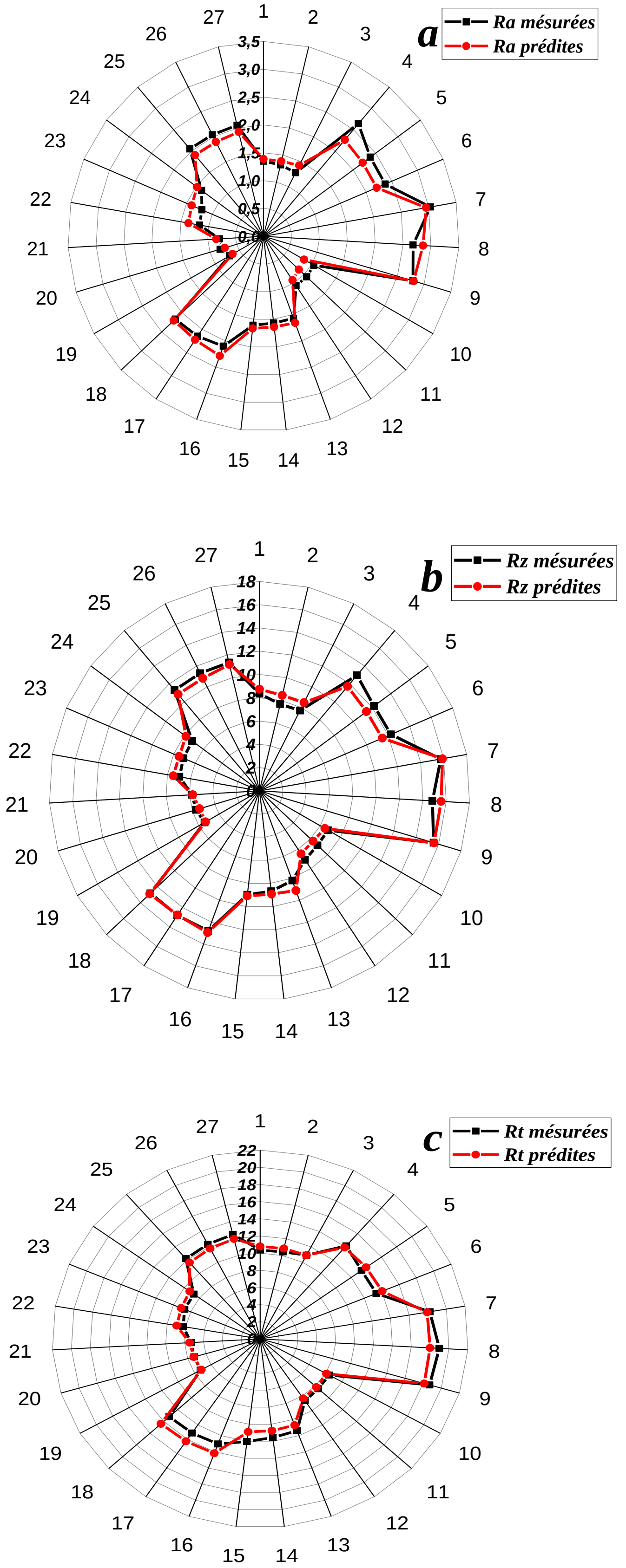


Figure IV. 8 (a, b et c) *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra, Rz et Rt)*

IV.4.3 ANOVA et modélisation de la puissance de coupe (*Pc*)

a) ANOVA pour (*Pc*)

Le tableau IV.8 expose les résultats de l'analyse de la variance pour la puissance de coupe (*Pc)*, on voit que tous les paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*) sont significatifs, mais la profondeur de passe (*Doc)* est le facteur le plus prépondérant, suivi par l'avance (*f*) et la vitesse de coupe (*Vc*), leurs contributions sont respectivement de (46.40, 30.50 et 12.63) %. Les interactions (*Vc×f*, *Vc×Doc* et *f ×Doc*) sont aussi significatives avec des contributions faibles (1.86, 3.52 et 4.14) % successivement.

Tableau IV. 8 *ANOVA pour la puissance de coupe (Pc)*

Source	*SC*	*dl*	*MC*	*F-Value*	*p-value*	*Cont,%*	
Model	2613000	9	290400	46,38	< 0.0001	96.06	significant
Vc	*378900*	*1*	*378900*	*60,52*	< 0.0001	*13,93*	significant
f	*745400*	*1*	*745400*	*119,06*	< 0.0001	*27,4*	significant
Doc	*1262000*	*1*	*1262000*	*201,56*	< 0.0001	*46,4*	significant
Vc×f	*50694,84*	*1*	*50694,84*	*8,1*	*0,0112*	*1,86*	significant
Vc×Doc	*95643,5*	*1*	*95643,5*	*15,28*	*0,0011*	*3,52*	significant
f×Doc	*112700*	*1*	*112700*	*18*	*0,0005*	*4,14*	significant
Vc^2	*82,17*	*1*	*82,17*	*0,013*	*0,9101*	*0*	
f^2	*14109,94*	*1*	*14109,94*	*2,25*	*0,1516*	*0,52*	
Doc^2	*21825,38*	*1*	*21825,38*	*3,49*	*0,0792*	*0,8*	
Residual	106400	17	6260,92				
Cor Total	2720000	26					

b) Graphes des effets principaux

La **figure IV.9** illustre les graphes des effets principaux pour la puissance de coupe (*Pc*) en fonction des paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*). Ces graphes confirment les résultats du tableau ANOVA. La profondeur de passe (*Doc*) a la plus grande pente ce qui signifie que ce facteur a un impact important sur (*Pc*), elle est suivie par l'avance (*f*) et en dernier lieu la vitesse de coupe (*Vc*).

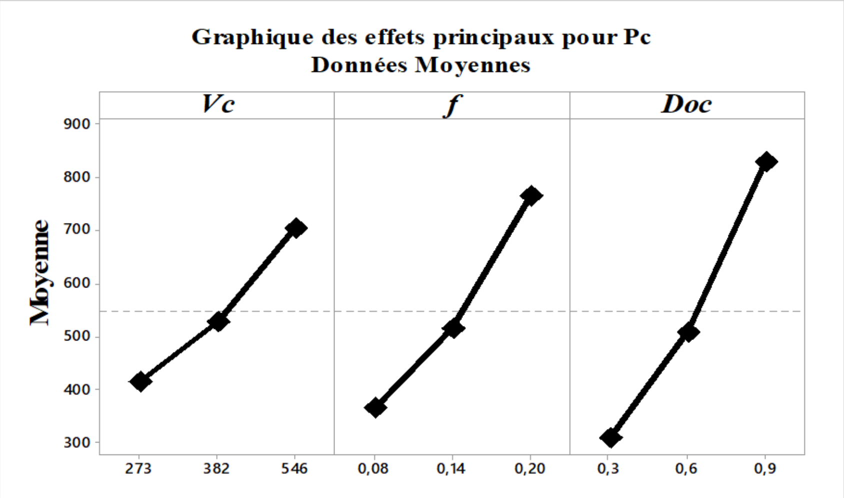


Figure IV. 9 *Graphes des effets principaux pour (Pc).*

c) Modèle de régression

L'équation (IV-14) présente l'analyse de régression de la puissance de coupe (*Pc*) en fonction de (*Vc*, *f* et *Doc*) avec tous les termes du modèle mathématique quadratique ainsi que le coefficient de détermination (R^2).

$$\boldsymbol{Pc} = 1016{,}30496 - 1{,}51072 * \mathrm{Vc} - 6827{,}24277 * f - 1559{,}18085 * \mathrm{Doc} + 7{,}88296 * \mathrm{Vc} * f + 2{,}16553 * \mathrm{Vc} * \mathrm{Doc} + 5384{,}02778 * f * \mathrm{Doc} + 2{,}08416\mathrm{e}^{-004} * \mathrm{Vc}^2 + 13470{,}52469 * f^2 + 670{,}13580 * \mathrm{Doc}^2 \quad (R^2=0.9606) \qquad \text{(IV.14)}$$

La **figure IV.10** présente la courbe 3D et le graphe de contour obtenus par la méthode de (*MSR*) pour la puissance de coupe (*Pc*) en fonction de (*Vc*, *f* et *Doc*). Les résultats exposés sur cette figure montrent que la puissance de coupe augmenter avec l'accroissement de tous les paramètres du régime de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*). D'autre part on a utilisé le graphique de contour pour explorer la relation éventuelle entre les deux paramètres de coupe (avance et profondeur de passe) avec la puissance de coupe en différent valeurs de vitesse de coupe.

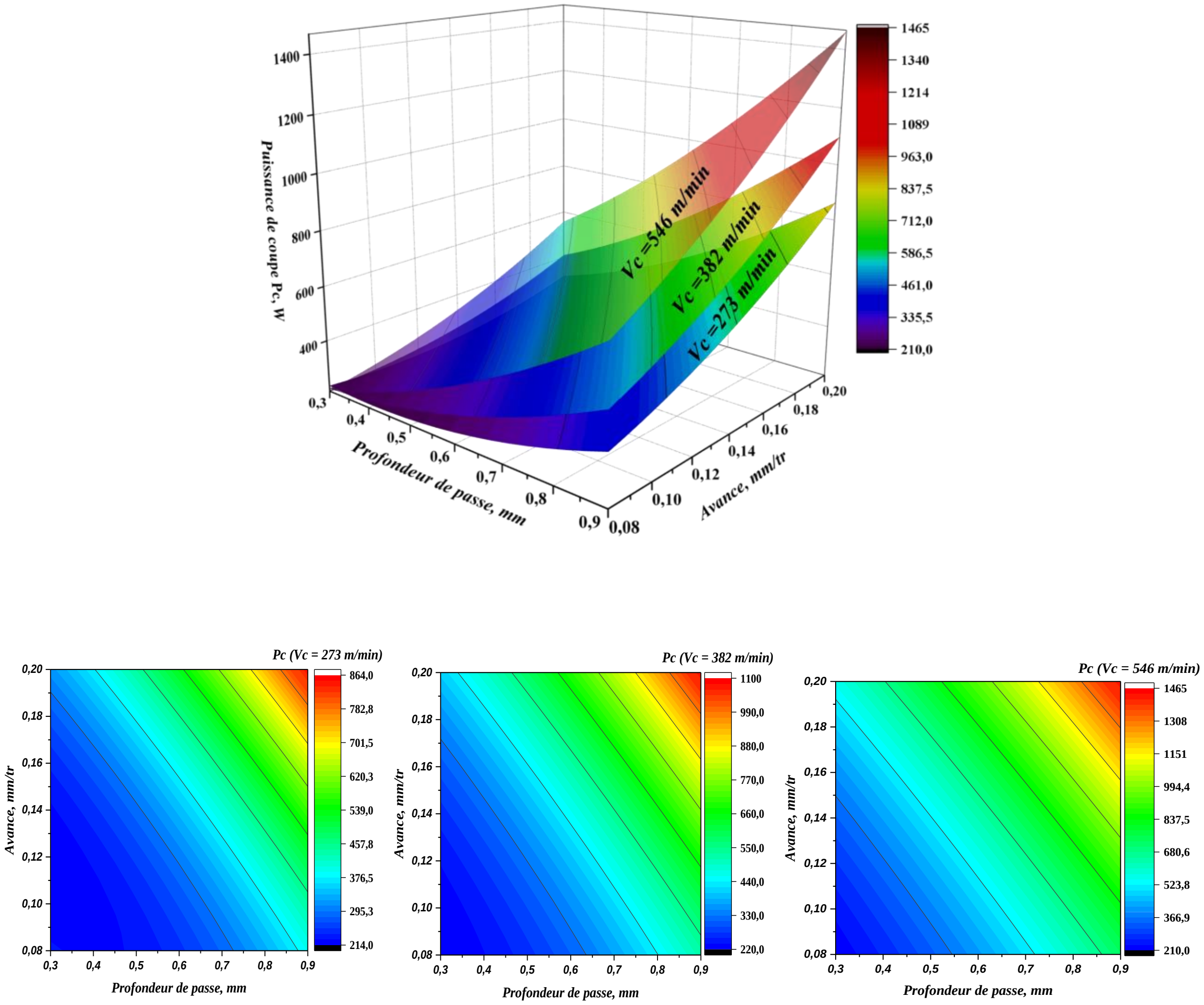


***Figure IV. 10** Courbes 3D et les graphes de contour* de *(Pc) en fonction (Vc, f et Doc) obtenus par la méthode MSR.*

La **figure IV.11** montre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par la méthode de surface de réponse (*MSR*) et les valeurs expérimentales de la puissance de coupe (*Pc*). On peut dire que les valeurs prédites des critères de rugosité de surface sont voisines de ceux enregistrés expérimentalement.

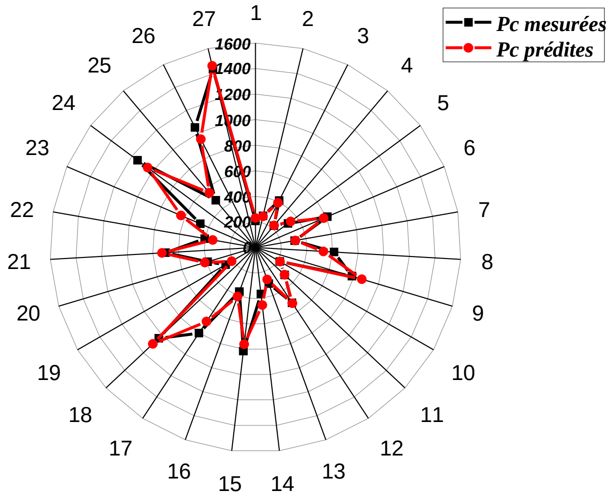


Figure IV. 11 *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Pc).*

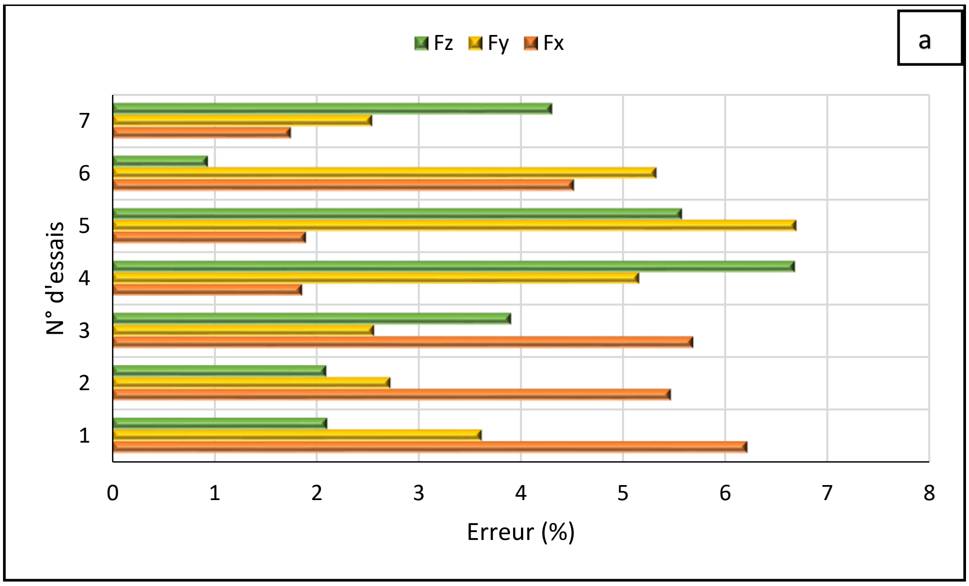
IV.4.4 Tests de confirmation

Afin de vérifier l'efficacité des modèles obtenus par la méthode (*MSR*), sept essais de confirmation avec différentes combinaisons de conception ont été effectués. Le tableau IV.9 ainsi que la **figure IV.12 (a et b)** montrent les résultats de ces essais de confirmation.

Tableau IV. 9 *Résultats des tests de confirmation*

N° d'essais	*Vc (m/min)*	*f (mm/rev)*	*Doc (mm)*	Résultats Expérimentaux	Résultats Prédit	Erreur (%)	Résultats Expérimentaux	Résultats Prédit	Erreur (%)
					Fx (N)			***Fy (N)***	
1	382	0,11	0,3	13,26	14,14	**6,22**	39,56	38,18	**3,61**
2	382	0,16	0,5	32,6	30,91	**5,47**	85,23	82,97	**2,72**
3	382	0,18	0,4	24,35	25,82	**5,69**	76,02	74,12	**2,56**
4	546	0,12	0,4	18,08	17,75	**1,86**	50,87	48,38	**5,15**
5	450	0,09	0,25	8,24	8,4	**1,90**	20,69	19,39	**6,70**
6	450	0,18	0,35	22,89	21,9	**4,52**	59,22	62,55	**5,32**
7	293	0,12	0,25	15,75	16,03	**1,75**	42,03	40,99	**2,54**
					Fz (N)			***Ra (µm)***	
1	382	0,11	0,3	34,78	35,53	**2,11**	1,27	1,31	**3,05**
2	382	0,16	0,5	70,5	69,05	**2,1**	1,76	1,83	**3,83**

3	382	0,18	0,4	69,3	66,69	**3,91**	2,02	2,05	**1,46**
4	546	0,12	0,4	41,2	38,62	**6,68**	1,12	1,13	**0,88**
5	450	0,09	0,25	31,04	29,4	**5,58**	0,898	0,856	**4,91**
6	450	0,18	0,35	56,74	57,28	**0,94**	1,938	1,82	**6,48**
7	293	0,12	0,25	39,09	40,85	**4,31**	1,89	1,97	**4,06**
					Rz (µm)			***Rt (µm)***	
1	382	0,11	0,3	7.36	7.63	**3.54**	8.98	9.28	**3.23**
2	382	0,16	0,5	9.41	10.1	**6.83**	11.41	11.8	**3.31**
3	382	0,18	0,4	11.98	11.44	**4.72**	12.53	12.94	**3.17**
4	546	0,12	0,4	7.01	6.6	**6.21**	8.45	8.3	**1.81**
5	450	0,09	0,25	6.25	6.02	**3.82**	7.90	7.59	**4.08**
6	450	0,18	0,35	10.49	10.35	**1.35**	11.66	11.53	**1.13**
7	293	0,12	0,25	10.12	10.12	**9.29**	10.83	12.07	**10.27**



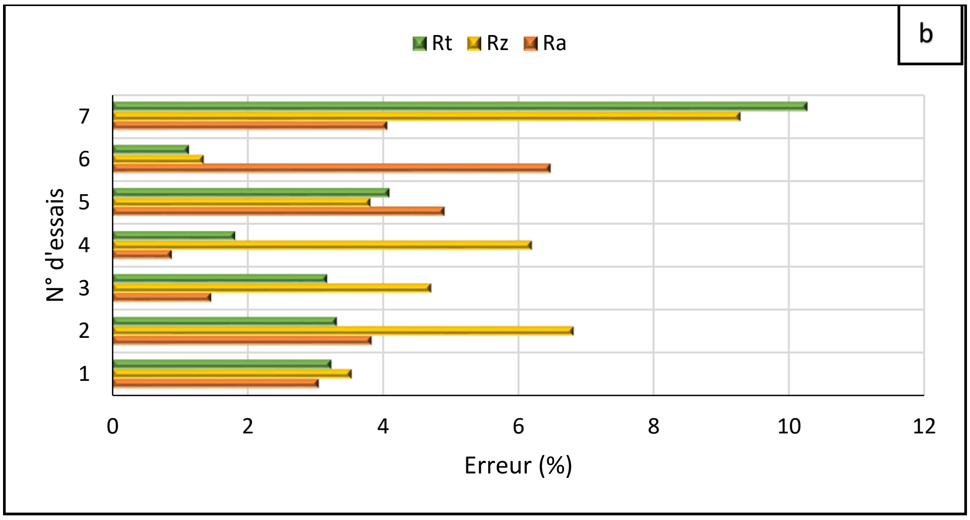


Figure IV. 12 *(a et b) Erreurs pour différents tests de confirmation.*

Les résultats obtenus montrent que les erreurs entre les résultats expérimentaux et leurs équivalents calculés sont compris dans la plage de (1.86% - 6.22%) pour (*Fx*), (2.56% - 6.70%) pour (*Fy*) et (0.94% - 6.68%) pour (*Fz*). Dans le cas des critères de rugosité (*Ra*, *Rz* et *Rt*), ils ont été trouvés à l'intérieur de l'intervalle (0.88% - 6.48%) pour *Ra*, (1.35% - 9.28%) pour *Rz* et (1.12% - 10.27%) pour *Rt*. Bien que les combinaisons des tests de confirmation aient été choisies de manière aléatoire, l'erreur relative n'a pas dépassé les 10.27%. Ceci reflète la bonne précision des modèles mathématiques développés.

IV.5 Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiels (*RNA*)

IV.5.1 Méthode des réseaux de neurones artificiels (*RNA*)

La méthode des réseaux de neurones artificiels (*RNA*) est un modèle de calcul statistique inspiré des neurones naturels, elle constitue une méthode d'approximation de systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser **[90]**. Les réseaux de neurones artificiels sont essentiellement constitués des paramètres d'entrée, qui sont multipliés par la force des signaux respectifs qui on appelle les poids, puis calculées par une fonction mathématique qui détermine l'activation du neurone. Les neurones peuvent être organisés de différentes manières, c'est ce qui définit l'architecture et le modèle du réseau. L'architecture la plus courante est celle dite du perceptron multicouche. Avant de pouvoir utiliser les capacités de classification d'un réseau de neurones, il faut le construire avec les étapes suivantes :

a. La construction de la structure du réseau.

b. La constitution d'une base de données de vecteurs représentant au mieux le domaine à modéliser.

c. Le paramétrage du réseau par apprentissage. Au cours de l'apprentissage, les vecteurs de données de la base d'apprentissage sont présentés séquentiellement et plusieurs fois au réseau. Un algorithme d'apprentissage ajuste le poids du réseau afin que les vecteurs soient correctement appris. L'apprentissage se termine lorsque l'algorithme atteint un état stable.

d. La phase de reconnaissance qui consiste à présenter au réseau chacun des vecteurs de la base de test.

Les neurones les plus fréquemment utilisés sont ceux pour lesquels la fonction de transfert *f* est une fonction non linéaire (généralement une tangente hyperbolique) d'une combinaison linéaire des entrées :

$$f = \tanh \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \qquad \text{(IV. 15)}$$

Avec *xi* sont les variables d'entrées du neurone, les *wi* sont des paramètres ajustables et *n* le nombre de neurones.

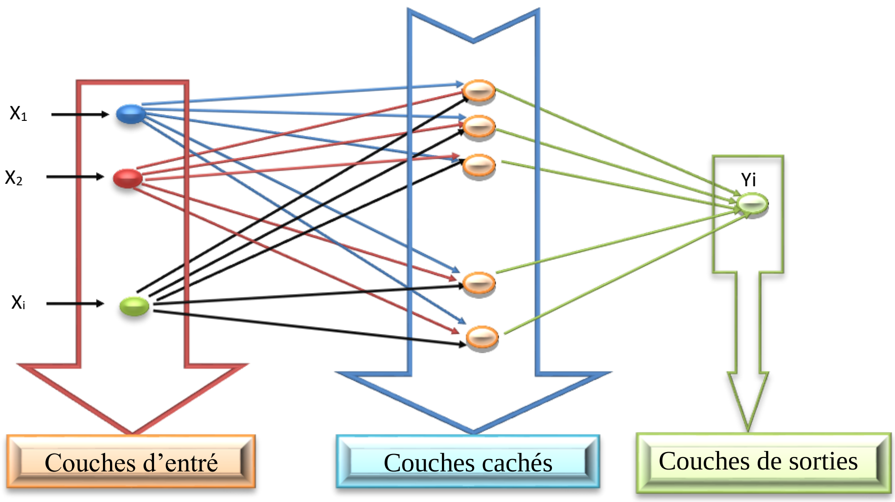


Figure IV. 13 *Architecture neurale*

Afin de modéliser les paramètres de performance des efforts de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*), les critères de rugosité de surface (*Ra, Rz et Rt*) et la puissance de coupe (*Pc*) lors du tournage du fonte grise EN-GJL-250 avec l'outil de coupe CBN7050, nous avons employé six perceptrons multicouches (une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie). Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 21 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 6 essais pour la validation qui ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro propagation qui est basé sur le gradient

descendant. Dans notre cas on a choisi un taux d'apprentissage η = 0.1. Nous avons utilisé un logiciel de calcul « *JMP 13* » pour l'apprentissage et la validation des réseaux.

IV.5.2 Modélisation des efforts de coupe (*Fx, Fy et Fz*)

a) Architecture neural

Pour la modélisation de des efforts de coupe *(Fx, Fy et Fz)*, nous avons adopté la structure **3-10-1** (**figure IV.14**). Avant de faire le choix de cette structure optimale, plusieurs structures de réseau ont étés testées. On a utilisé 21 essais pour l'apprentissage du réseau et 6 sont arbitrairement choisis pour valider le réseau de totale des essais expérimentaux de 27 essais. La structure optimale est choisie selon le coefficient de déterminationR^2 et l'erreur racine carrée (*RMSE*) pour les ensembles d'apprentissage et de validation. La structure optimale choisi est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, ce qui correspond au nombre de paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*), dix nœuds dans la couche cachée ayant une fonction de transfert tangent hyperbolique et un nœud dans la couche de sortie ayant une fonction de transfert linéaire.

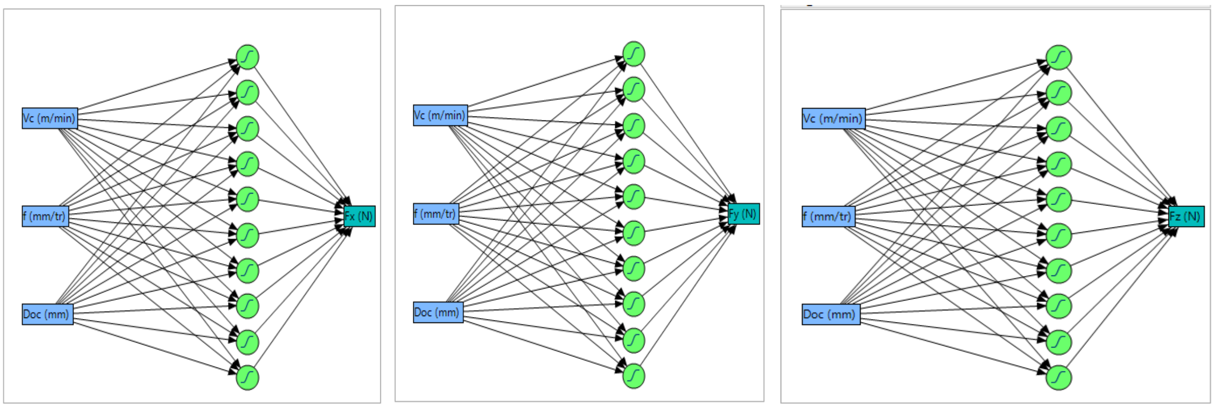


Figure IV. 14 *Architecture neurale choisie pour les efforts de coupe (Fx, Fy et Fz).*

b) Modèles mathématiques

La somme des sorties des dix neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire, nous donne les modèles mathématiques de (*Fx, Fy et Fz*) indiqués dans les équations (IV.16, IV.17 et IV.18). Les termes de H_1 à H_{10} sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée de l'architecture.

$$\boldsymbol{Fx} = -12.9537\times H1+11.3363\times H2+6.4928\times H3-2.4152\times H4-0.6497\times H5+4.3138\times H6+8.3863\times H7-24.7433\times H8+24.1714\times H9+5.6508\times H10+54.5005\;; \quad \text{(IV.16)}$$

$$\mathbf{H1} = \tanh(0.5\times(0.0038\times Vc-45.3021\times f+7.3307\times Doc-1.2077));$$
$$\mathbf{H2} = \tanh(0.5\times(-0.0007\times Vc-8.7589\times f+3.9175\times Doc-2.6025));$$
$$\mathbf{H3} = \tanh(0.5\times(-0.0074\times Vc+13.8917\times f+4.4562\times Doc-0.8145));$$

H4 = $\tanh(0.5\times(0.0053\times Vc+26.1011\times f-5.4128\times Doc-2.8116))$;
H5 = $\tanh(0.5\times(-0.0128\times Vc-39.9535\times f-6.2199\times Doc+14.6760))$;
H6 = $\tanh(0.5\times(0.02468\times Vc-0.8649\times f-6.6115\times Doc-6.4000))$;
H7 = $\tanh(0.5\times(0.01059\times Vc-22.07600\times f+0.8129\times Doc-0.5124))$;
H8 = $\tanh(0.5\times(-0.0034\times Vc+12.6987\times f-5.3637\times Doc+3.8535))$;
H9 = $\tanh(0.5\times(-0.0117\times Vc+13.5686\times f+4.7294\times Doc-1.4696))$;
H10 = $\tanh(0.5\times(-0.0136\times Vc+42.4444\times f-0.03014\times Doc+0.5323))$;

$$Fy = -35.2564\times H1+30.3933\times H2+108.6466\times H3-5.0451\times H4-44.3410\times H5-9.0031\times H6-22.0025\times H7-2.4295\times H8-39.5103\times H9+55.8503\times H10+9.2557; \quad (IV.17)$$

H1 = $\tanh(0.5\times(0.01001\times Vc+3.3364\times f-0.3457\times Doc-3.7300))$;
H2 = $\tanh(0.5\times(0.0043\times Vc-0.4422\times f+2.7013\times Doc-2.6576))$;
H3 = $\tanh(0.5\times(-0.0008\times Vc+7.4273\times f-0.8940\times Doc+0.7517))$;
H4 = $\tanh(0.5\times(0.0007\times Vc-0.8777\times f-0.1622\times Doc-0.1709))$;
H5 = $\tanh(0.5\times(0.0008\times Vc-20.4241\times f-6.5412\times Doc+6.0037))$;
H6 = $\tanh(0.5\times(0.0010\times Vc-1.8087\times f-0.5734\times Doc+0.0797))$;
H7 = $\tanh(0.5\times(-0.0080\times Vc-4.7201\times f+4.6802\times Doc+0.9140))$;
H8 = $\tanh(0.5\times(-0.0006\times Vc-1.7203\times f-0.1905\times Doc+0.5673))$;
H9 = $\tanh(0.5\times(0.0015\times Vc+32.2612\times f-6.6226\times Doc-2.2259))$;
H10 = $\tanh(0.5\times(0.0012\times Vc+6.5211\times f-1.0991\times Doc-0.5736))$;

$$Fz=-7.0838\times H1 + 14.2789\times H2 -40.2394\times H3 + 33.4893\times H4 -22.3561\times H5 + 105.1841\times H6 -31.7491\times H7 -120.6082\times H8 + 143.4534\times H9 + 58.1620\times H10 + 83.5467; \quad (IV.18)$$

H1 = $\tanh(0.5\times(0.0065\times Vc-23.3074\times f-2.4163\times Doc+ 0.8261))$;
H2 = $\tanh(0.5\times(-0.0020\times Vc+1.9166\times f+5.1810\times Doc-1.7367))$;
H3 = $\tanh(0.5\times(-0.0029\times Vc+1.5550\times f-2.3157\times Doc+4.7786))$;
H4 = $\tanh(0.5\times(-0.0020\times Vc-29.8895\times f+3.2193\times Doc+2.5610))$;
H5 = $\tanh(0.5\times(-0.0147\times Vc-12.1328\times f-3.1755\times Doc+11.3463))$;
H6 = $\tanh(0.5\times(0.0012\times Vc+22.8996\times f-1.6940\times Doc-3.2764))$;
H7 = $\tanh(0.5\times(-0.0027\times Vc+2.2605\times f-1.8952\times Doc-0.6002))$;
H8 = $\tanh(0.5\times(0.0010\times Vc-32.4004\times f-5.9240\times Doc+ 9.1427))$;
H9 = $\tanh(0.5\times(-0.0032\times Vc-9.9707\times f-1.2412\times Doc+ 4.6515))$;
H10 = $\tanh(0.5\times(0.0017\times Vc-40.6133\times f-2.5529\times Doc+ 7.3933))$;

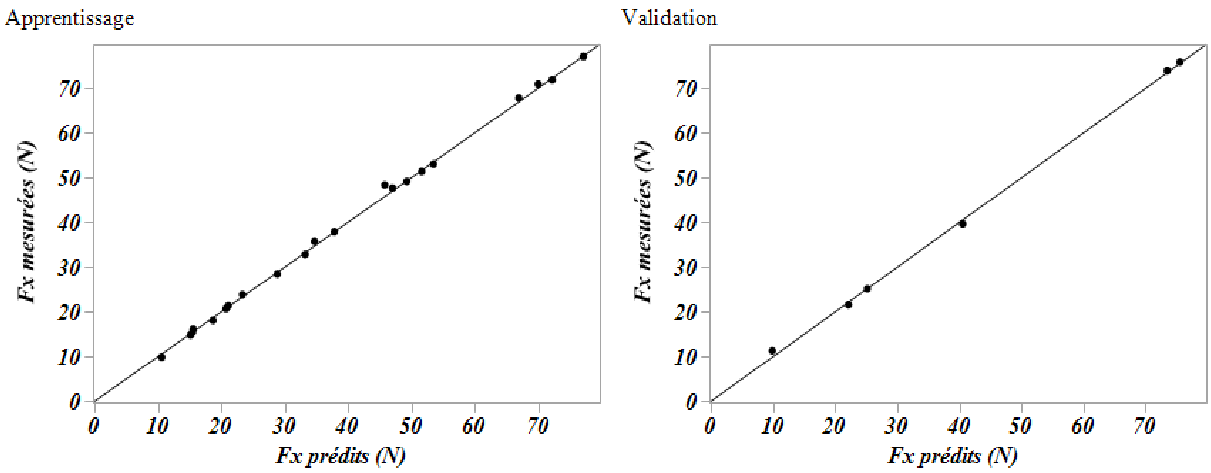
Le **tableau (IV.10)** présente les valeurs du R^2, (*RMSE*) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) de la structure optimale choisie. Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0.9933 et 0.9894) pour *Fx*, (0.9986 et 0.998) pour *Fy* et (1 et 0,9944) pour *Fz*. Pour les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (1.7757 et 2.2205) pour *Fx*, (1.2523 et 1.2491)

pour *Fy* et (0,0010 et 3,4280) pour *Fz*, ce qui nous donne un coefficient de détermination globale R^2 (0.9924, 0.9987 et 0.9987) pour (*Fx*, *Fy* et *Fz*) respectivement.

Tableau IV. 10 *Conditions de la modélisation de l'effort de coupe par la méthode (RNA)*

Mesures	Apprentissage	Validation
	Fx	
Coefficient de détermination (R^2)	0.9933	0.9894
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	1.7757	2.2205
Somme fréquences	21	6
	Fy	
Coefficient de détermination (R^2)	0.9986	0.9988
Racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*)	1.2523	1.2491
Somme fréquences	21	6
	Fz	
Coefficient de détermination (R^2)	1	0.9944
Racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*)	0.0010	3.4280
Somme fréquences	21	6

Les valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondant aux l'effort de coupe (*Fx*, *Fy et Fz*) sont présentées dans la **figure IV.15**. Il est bien vu que la majorité des points d'intersection sont proches de la ligne médiane, ce qui confirme la robustesse de la méthode de modélisation des *RNA*.



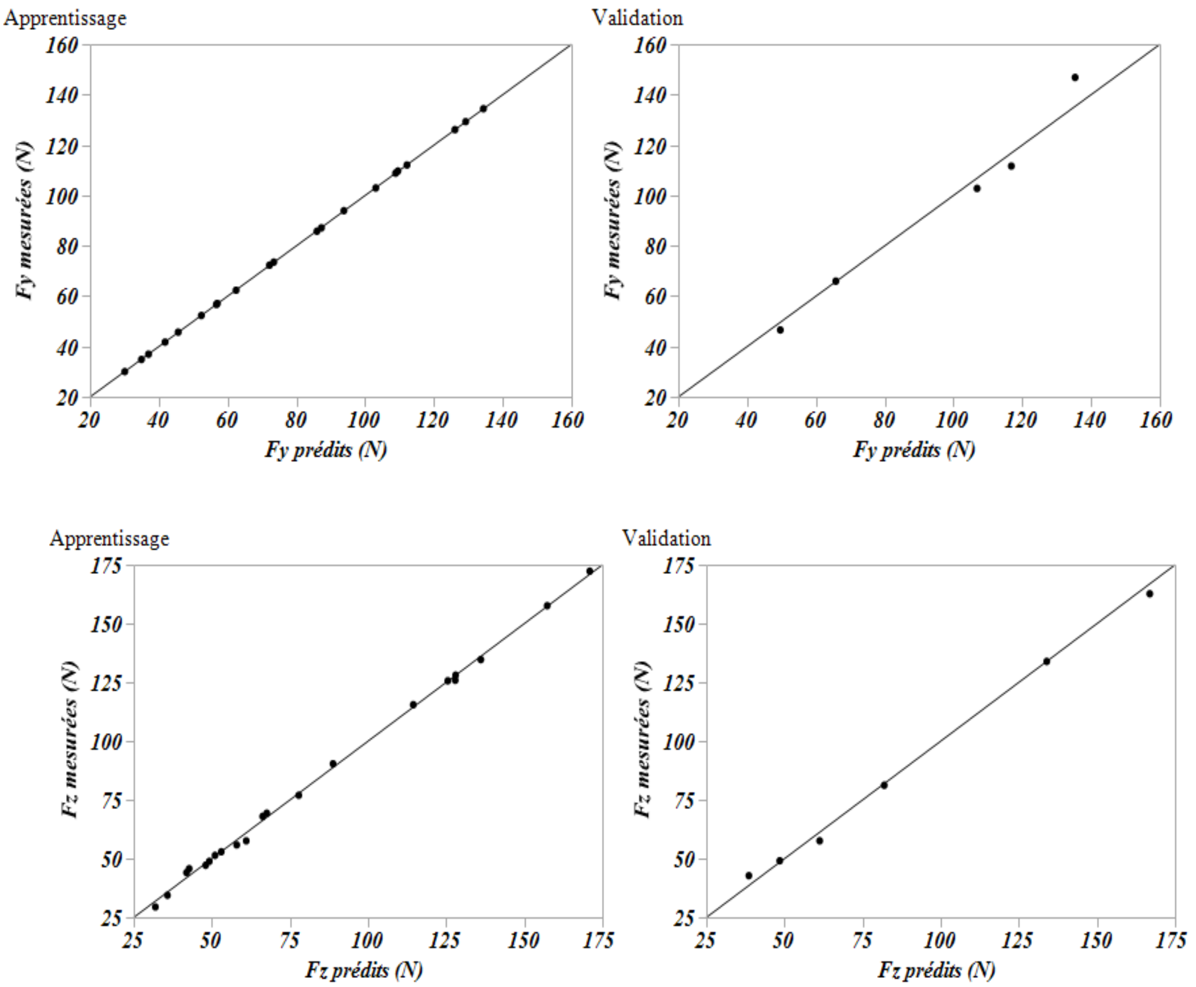


***Figure IV. 15** Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour les efforts de coupe (Fx, Fy* et *Fz)* par méthode *RNA.*

La **figure IV. 16** illustre les graphes de surface en 3D des composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) et les graphiques de contours en fonction des paramètres d'entrée (*Vc, f et Doc*). Cette figure montre que l'augmentation de la profondeur de passe (*Doc)* et l'avance (*f)* fait augmenter l'effort de coupe considérablement. Donc Il est clair que la profondeur de passe est le facteur prédominant sur (*Fx, Fy* et *Fz*). Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la section du copeau enlevé ainsi que les forces de frottement.

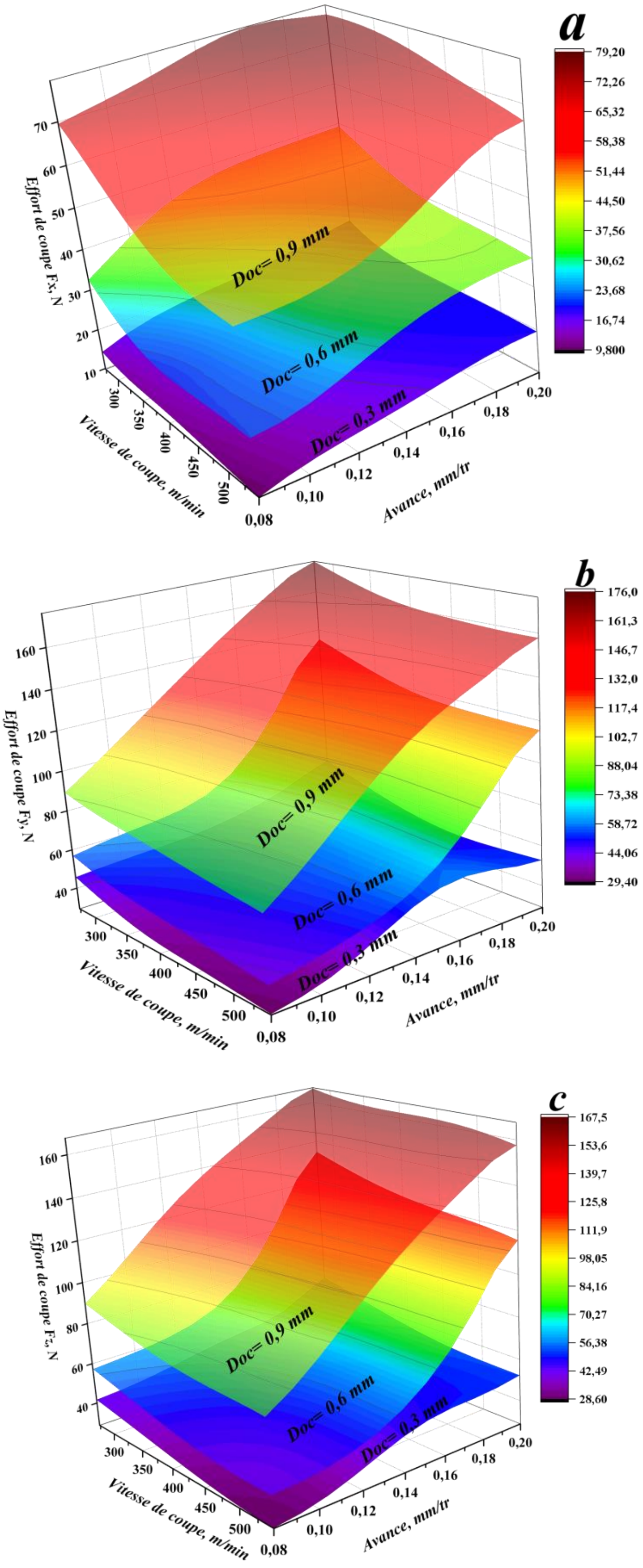


Figure IV. 16 *Courbes 3D sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur (Fx, Fy et Fz) par la méthode (RNA).*

Les graphiques de contour (**Figure IV.17**) sont utilisés pour établir les valeurs de réponse et les conditions de fonctionnement souhaitables. Les graphiques de contours ressemblent à la forme du profil curviligne selon les modèles par la méthode *RNA*. Il ressort de ces figures que, si l'avance (*f*) et (*Doc*) prend de petites valeurs et si la vitesse (*Vc*) prend une grande valeur, alors les efforts de coupe sont à leurs faibles niveaux.

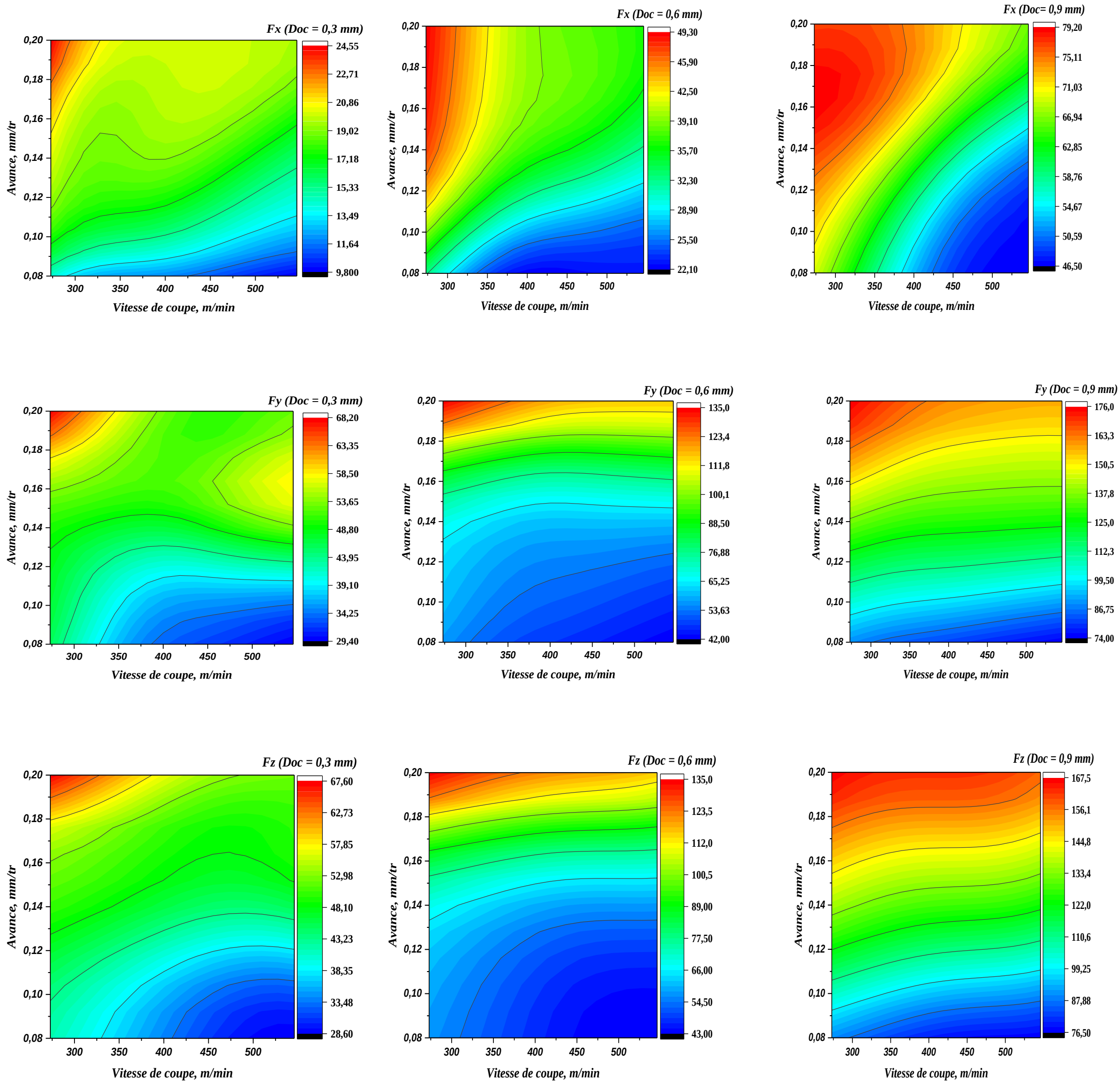


Figure IV. 17 *Graphes de contour sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur (Fx, Fy et Fz) par la méthode RNA.*

IV.5.3 Modélisation des critères de rugosité de surface (*Ra, Rz et Rt*)

a) Architecture neural

Pour la modélisation des critères de rugosité, nous avons adopté la structure **3-10-1** (**figure IV.18**). Avant de faire le choix de cette structure optimale, on a réalisé plusieurs structures de réseau. La même chose que les efforts de coupe, 21 essais ont été choisis pour l'apprentissage du réseau et 6 sont choisis arbitrairement pour valider le réseau total des essais expérimentaux de 27 essais. Aussi, la structure optimale est choisie selon le coefficient de déterminationR^2 et l'erreur racine carrée (*RMSE*) pour les ensembles d'apprentissage et de validation. La structure optimale choisi est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, ce qui correspond au nombre de paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*), dix nœuds dans la couche cachée ayant une fonction de transfert tangent hyperbolique et un nœud dans la couche de sortie ayant une fonction de transfert linéaire.

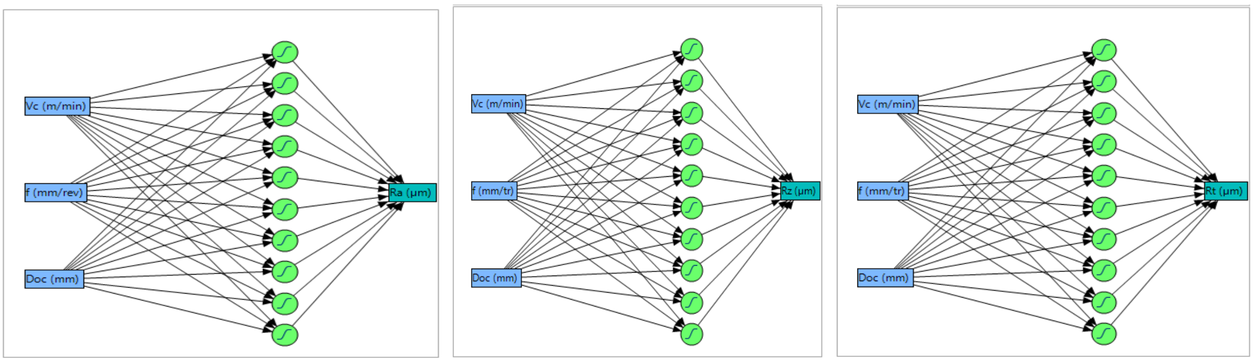


Figure IV. 18 *Architecture neuronale choisie pour les critères de rugosité (Ra, Rz et Rt).*

b) Modèles Mathématiques

Après le choix de l'architecture, l'analyse par *RNA* nous donne les modèles mathématiques de (*Ra, Rz et Rt*) qui est la somme des sorties des dix neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire. Les termes de H_1 à H_{10} présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée. Les modèles sont présentés par les équations (IV.19, IV.20 et IV.21).

$$\boldsymbol{Ra} = -1.3313 \times \mathrm{H1} + 0.4994 \times \mathrm{H2} + 0.6661 \times \mathrm{H3} - 0.4803 \times \mathrm{H4} + 0.9741 \times \mathrm{H5} + 5.8655 \times \mathrm{H6} - 0.3912 \times \mathrm{H7} + 0.4235 \times \mathrm{H8} - 1.9482 \times \mathrm{H9} + 1.4340 \times \mathrm{H10} + 0.99 \qquad \text{(IV. 19)}$$

H1 = tanh (0.5×(0.0056×*Vc* + 12.9938×*f* + 0.9983×*Doc* - 4.8904));
H2 = tanh (0.5×(0.0098×*Vc* + 15.6074×*f* + 1.4938×*Doc* - 5.8396));
H3 = tanh (0.5×(-0.0034×*Vc* + 22.2135×*f* + 0.9952×*Doc* -1.0647));
H4 = tanh (0.5×(0.0064×*Vc* -51.1964×*f* -3.7595×*Doc* + 7.3937));
H5 = tanh (0.5×(-0.0146×*Vc* -8.5875×*f* + 2.5704×*Doc* + 5.6775));
H6 = tanh (0.5×(0.0033×*Vc* + 3.2671×*f* -0.4434×*Doc* -1.1216));

H7 = tanh (0.5×(-0.0082×*Vc* + 5.7060×*f* + 4.2368×*Doc* -0.2830));
H8 = tanh (0.5×(-0.0040×*Vc* -33.0537×*f* -1.6798×*Doc* + 7.8565));
H9 = tanh (0.5×(-0.0045×*Vc* -5.5740×*f* -1.4516×*Doc* + 4.5348));
H10 = tanh (0.5×(-0.0173×*Vc* -1.7436×*f* + 0.0837×*Doc* + 6.3538));

Rz =-0.4321×H1+3.3869×H2+0.0503×H3-3.5774×H4+0.39671×H5-10.1604×H6-2.6502×H7 +6.3167×H8-33.8169×H9+4.5630×H10+0.7783; (IV. 20)

H1 = tanh(0.5×(-0.0028×*Vc*+0.8172×*f*+0.5951×*Doc*+0.4948));
H2 = tanh(0.5×(-0.0006×*Vc*+2.4684×*f*-1.1525×*Doc*+0.4533));
H3 = tanh(0.5×(0.0010×*Vc*-2.9783×*f*-0.3790×*Doc*+0.2248));
H4 = tanh(0.5×(-0.0099×*Vc*+9.7725×*f*-1.5202×*Doc*+3.6271));
H5 = tanh(0.5×(-0.0011×*Vc*-0.6831×*f*+0.0103×*Doc*+0.4117));
H6 = tanh(.5×(0.0082×*Vc*-19.1585×*f*+0.2942×*Doc*+0.0488));
H7 = tanh(0.5×(0.0006×*Vc*-1.9033×*f*+0.6115×*Doc*-0.2427));
H8 = tanh(0.5×(-0.0122×*Vc*-19.5515×*f*+0.3849×*Doc*+6.6539));
H9 = tanh(0.5×(-0.0016×*Vc*-1.5098×*f*+0.2675×*Doc*-0.2576));
H10 = tanh(0.5×(0.0029×*Vc*+4.7742×*f*+2.3051×*Doc*-3.5167));

Rt=-5.8141×H1+1.7718×H2-0.7793×H3+4.2964×H4-0.7771×H5-0.97063×H6+2.7711×H7-3.8240×H8-9.9402×H9-10.8691×H10+22.0876; (IV. 21)

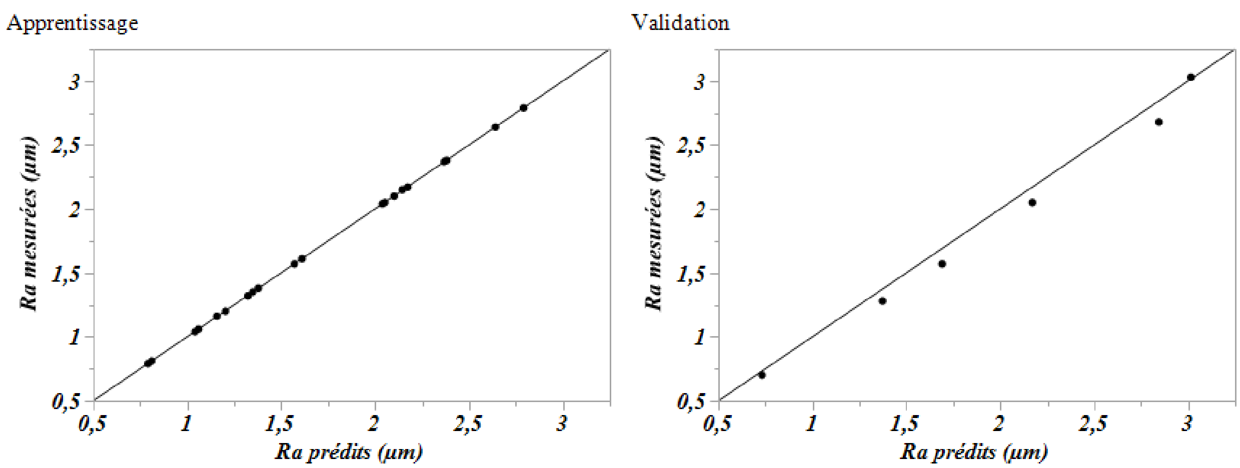
H1 = tanh(0.5×(0.0065×*Vc*-5.4986×*f* + 0.3677×*Doc*-0.5561));
H2 = tanh(0.5×(-0.0193×*Vc*+11.9490×*f*-2.4591×*Doc*+5.5800));
H3 = tanh(0.5×(0.0031×*Vc*+15.4270×*f*-2.5316×*Doc*-3.3679));
H4 = tanh(0.5×(-0.0320×*Vc*-60.7010×*f* +0.1868×*Doc*+22.7354));
H5 = tanh(0.5×(-0.0129×Vc+17.5294×*f*-3.3227×*Doc*+4.6056));
H6 = tanh(0.5×(0.0015×*Vc*+3.0840×*f*+3.7299×*Doc*-3.9945));
H7 = tanh(0.5×(-0.0002×*Vc*-20.1648×*f*+0.0987×*Doc*+0.1653));
H8 = tanh(0.5×(-0.0161×*Vc*-42.7751×*f*-1.4327×*Doc*+14.3586));
H9 = tanh(0.5×(-0.0052×*Vc*-4.2131×*f*+0.8251×*Doc*+2.8048));
H10 = tanh(0.5×(0.0030×*Vc*-6.4261×*f*-0.8464×*Doc*+0.6044));

Le tableau IV.11 présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation). Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0.9872 et 0.9866) pour *Ra*, (0.9993 et 0.9895) pour *Rz* et (0.9948 et 0.9944) pour *Rt*. Concernant les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0,1055 et 0,1083) pour *Ra*, (0.0772 et 0.3432) pour *Rz* et (0.2279 et 0.0849) pour *Rt.* Ce qui nous donne un coefficient de détermination globale R^2 = 0.9870, 0.9971, 0.9947 pour (*Ra, Rz* et *Rt*). Ces résultats prouvent que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Tableau IV. 11 *Conditions de la modélisation de la rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) par (RNA)*

Mesures	**Apprentissage**	**Validation**
	Ra	
Coefficient de détermination(R^2)	0.9872	0.9866
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.1055	0.1083
Somme fréquences	21	6
	Rz	
Coefficient de détermination(R^2)	0.9993	0,9895
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0772	0.3432
Somme fréquences	21	6
	Rt	
Coefficient de détermination(R^2)	0.9948	0,9944
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.2279	0.0849
Somme fréquences	21	6

La **figure IV.19** expose les tracés des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes. Nous pouvons constater de cette figure que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches de la ligne médiane pour les ensembles d'apprentissage et de validation (avec une inclinaison de 45°), ce qui prouve l'efficacité du modèle des *RNA*.



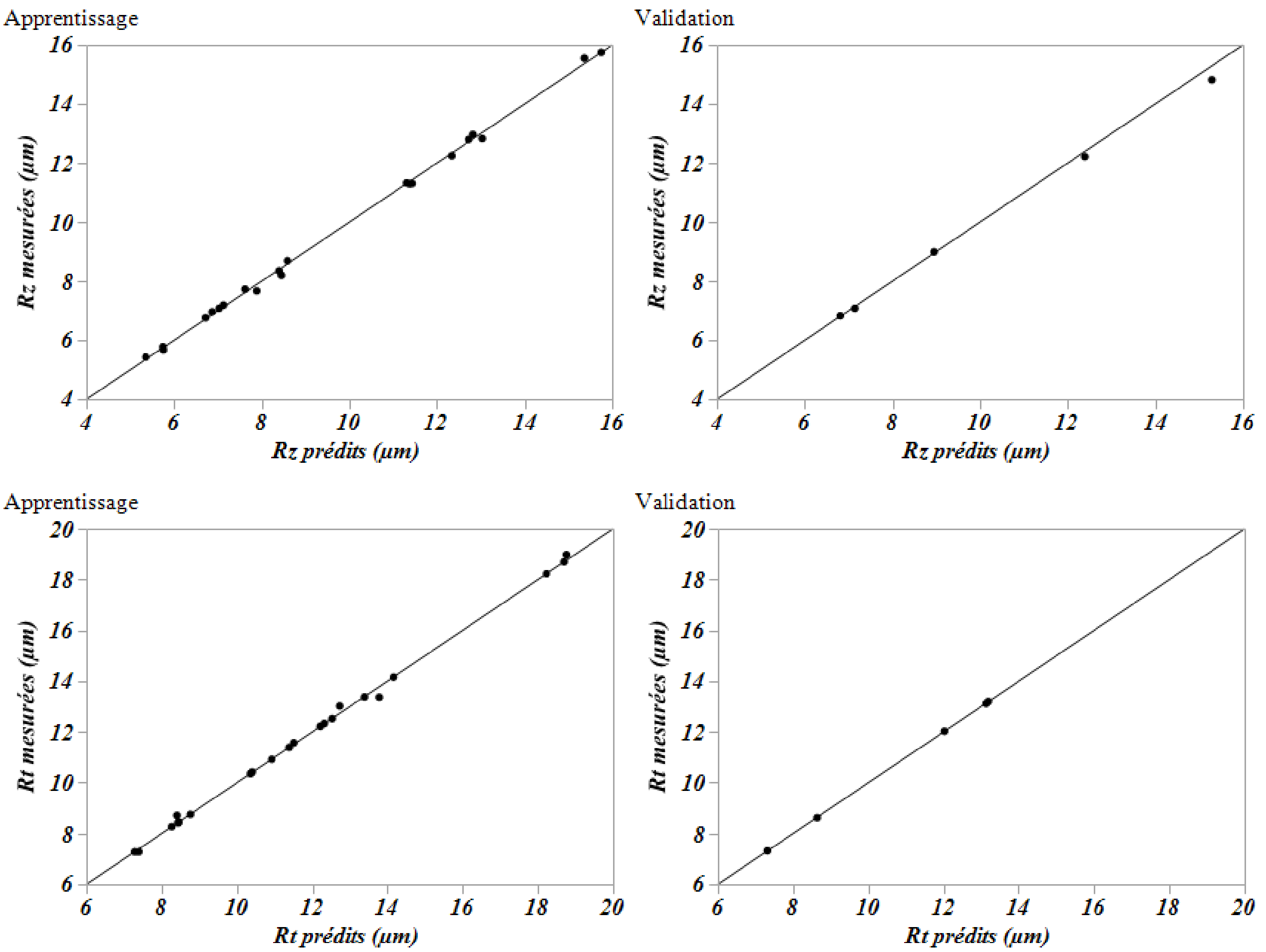


***Figure IV. 19** Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour les critères de rugosité (Ra, Rz* et *Rt)* par la méthode *RNA.*

La **figure IV.20** permet d'évaluer l'influence simultanée de (*Vc*, *f* et Doc) sur le critère de rugosité de surface (*Ra, Rz et Rt*). L'analyse des surfaces 3D indique que l'effet de l'avance est remarquable, pour la pente de la vitesse de coupe est moins importante suivie par la profondeur de passe. La meilleure rugosité de la surface usinée est obtenue avec la combinaison de la plus grande valeur de *Vc* et la plus petite valeur de *f.*

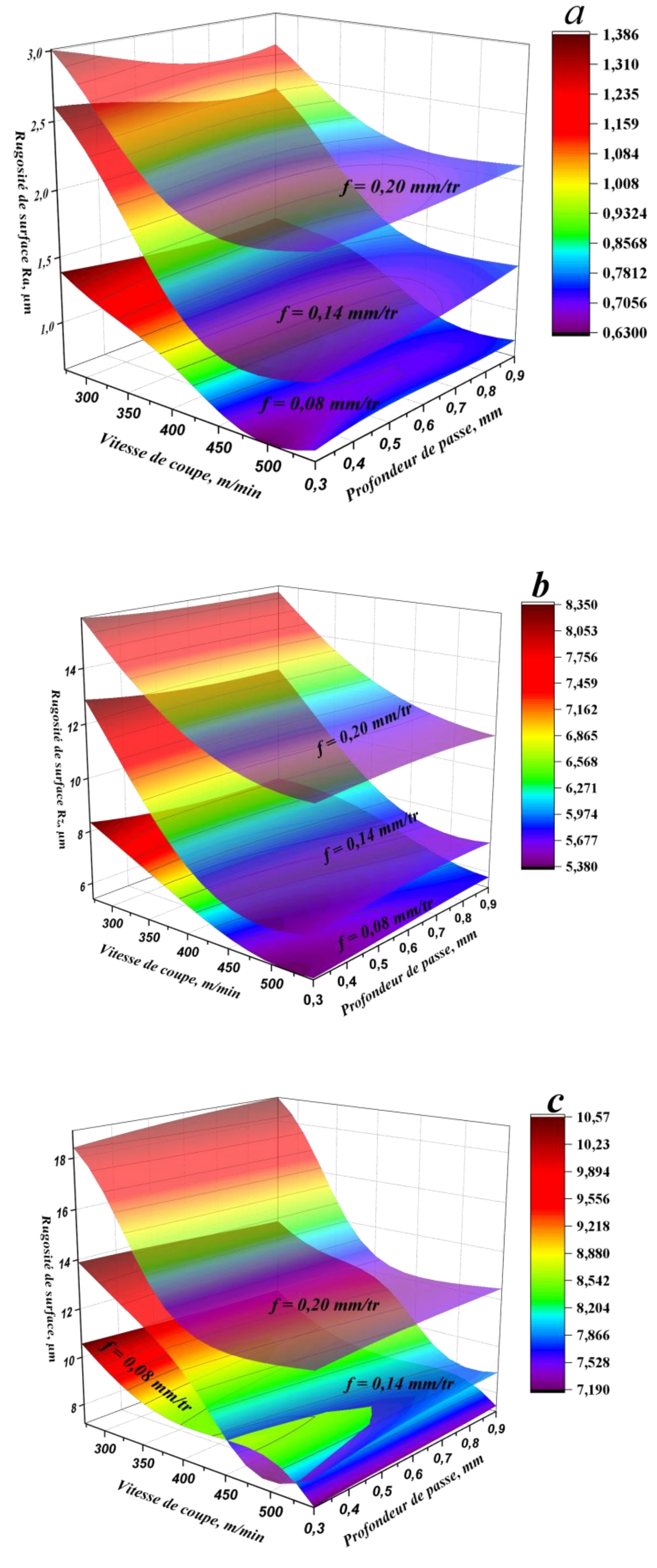


***Figure IV. 20** Courbes 3D sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur* (*Ra, Rz* et *Rt*) *par la méthode RNA.*

Les graphes de contour (**figure IV. 21**) permettent de visualiser la relation entre une valeur de réponse et les facteurs (*Vc*, *doc*) à partir d'un modèle d'équation. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables, par exemple les meilleures valeurs de *Ra* sont dans la région des grandes valeurs de *Vc*.

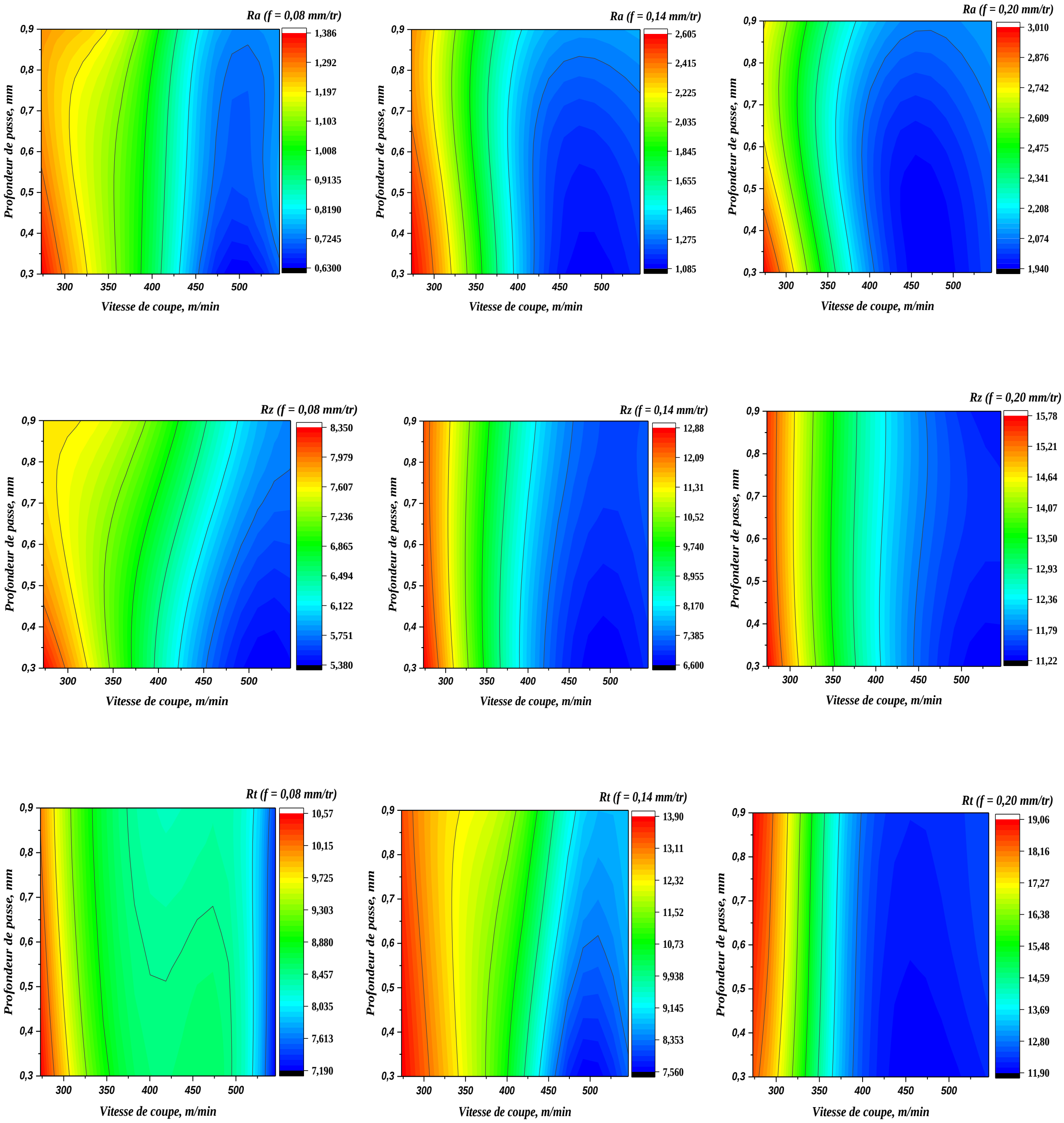


Figure IV. 21 *Graphes de contour sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur (Ra, Rz et Rt) par la méthode RNA.*

IV.5.4 Modélisation de la puissance de coupe (*Pc*)

a) Architecture neural

La structure du réseau de neurones qui a donnée de meilleurs résultats dans la modélisation de puissance de coupe est 3-4-1 (**Figure IV.22**). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre de paramètres), une couche cachée à 4 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Pareillement au cas précédent, 21 essais ont été utilisés pour l'apprentissage du réseau et 6 essais ont été choisis aléatoirement pour valider le modèle.

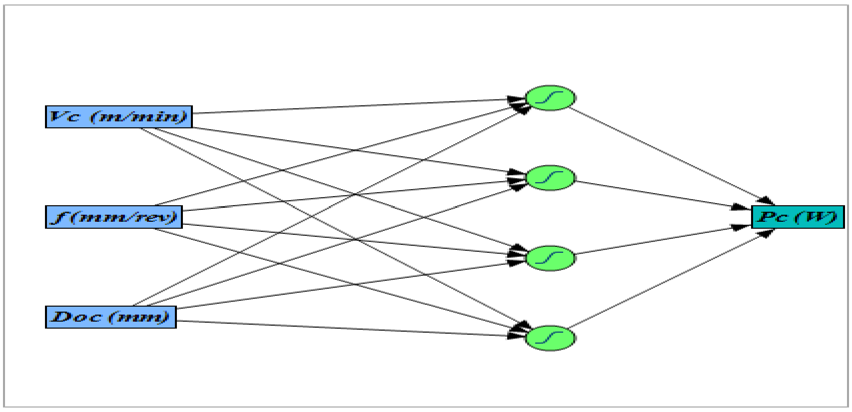


Figure IV. 22 *Architecture neurale choisie pour puissance de coupe (Pc).*

b) Modèles mathématiques

Le modèle mathématique de la puissance de coupe (*Pc*) est présenté dans l'équation (IV.22).

$$\boldsymbol{Pc} = -721.4002 \times H1 + 343.4778 \times H2 + 567.6061 \times H3 - 830.2561 \times H4 + 1074.350 \quad \text{(IV.22)}$$

Les coefficients de H_1 à H_4 sont les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée de ***Pc*** :

$$\mathbf{H1} = \tanh(0.5\times(-0.0017\times Vc - 17.7833\times f - 3.5659\times Doc + 6.0386));$$
$$\mathbf{H2} = \tanh(0.5\times(0.0044\times Vc - 5.4882\times f - 1.2068\times Doc + 0.1919));$$
$$\mathbf{H3} = \tanh(0.5\times(-0.0048\times Vc - 8.7371\times f - 2.7235\times Doc + 4.3331));$$
$$\mathbf{H4} = \tanh(0.5\times(-0.0034\times Vc - 5.3052\times f - 2.2738\times Doc + 4.2399));$$

Le **tableau IV.12** présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) de la structure optimale choisie. Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de corrélation R^2 sont respectivement (0.9832 et 0.9516) et les racines de l'erreur

quadratique moyenne sont respectivement (36.1926 et 90.4407), le coefficient de détermination globale est de 0.9761.

Tableau IV. 12 *Conditions de la modélisation de puissance de coupe (Pc) par (RNA).*

Mesures	Apprentissage	Validation
Coefficient de détermination (R^2)	0.9832	0.9516
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	36.1926	90.4407
Somme fréquences	21	6

La **figure IV.23** présente le tracé des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes pour puissance de coupe (*Pc*). Il est bien vu que la généralité des points d'intersection sont voisines de la ligne médiane, ce qui confirme la puissance de la modélisation des RNA.

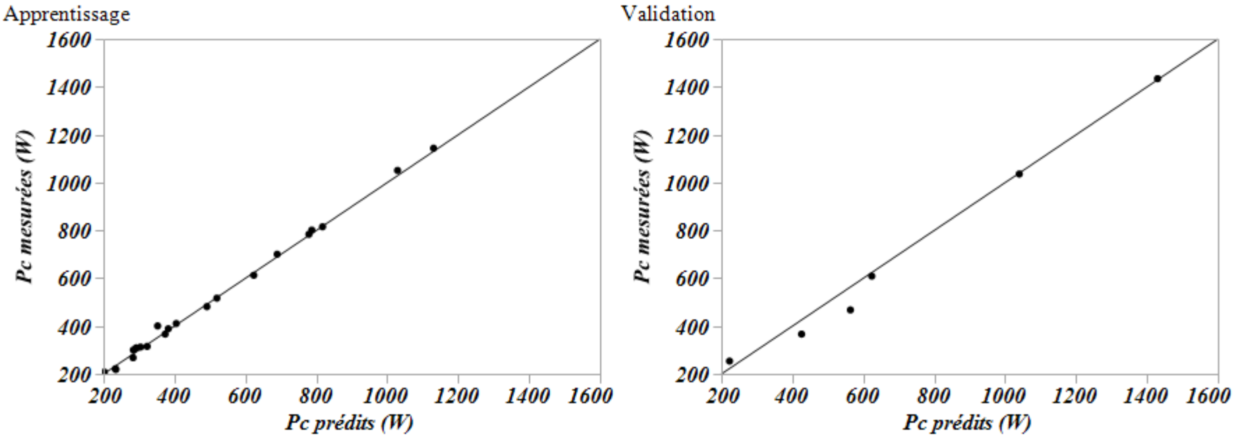


Figure IV. 23 *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Pc).*

Les graphiques 3D des surfaces et les graphes de contour de *Pc* en fonction des facteurs d'entré sont représentés dans la **figure IV.24**. On constate que l'augmentation de tous les paramètres de coupe (*Vc*, *f et Doc*) induisent une augmentation de (*Pc*). Évidemment, on remarque que la plus grande puissance (*Pc*) est obtenue en appliquant une grande vitesse de coupe et une grande avance avec une grande valeur de profondeur de passe.

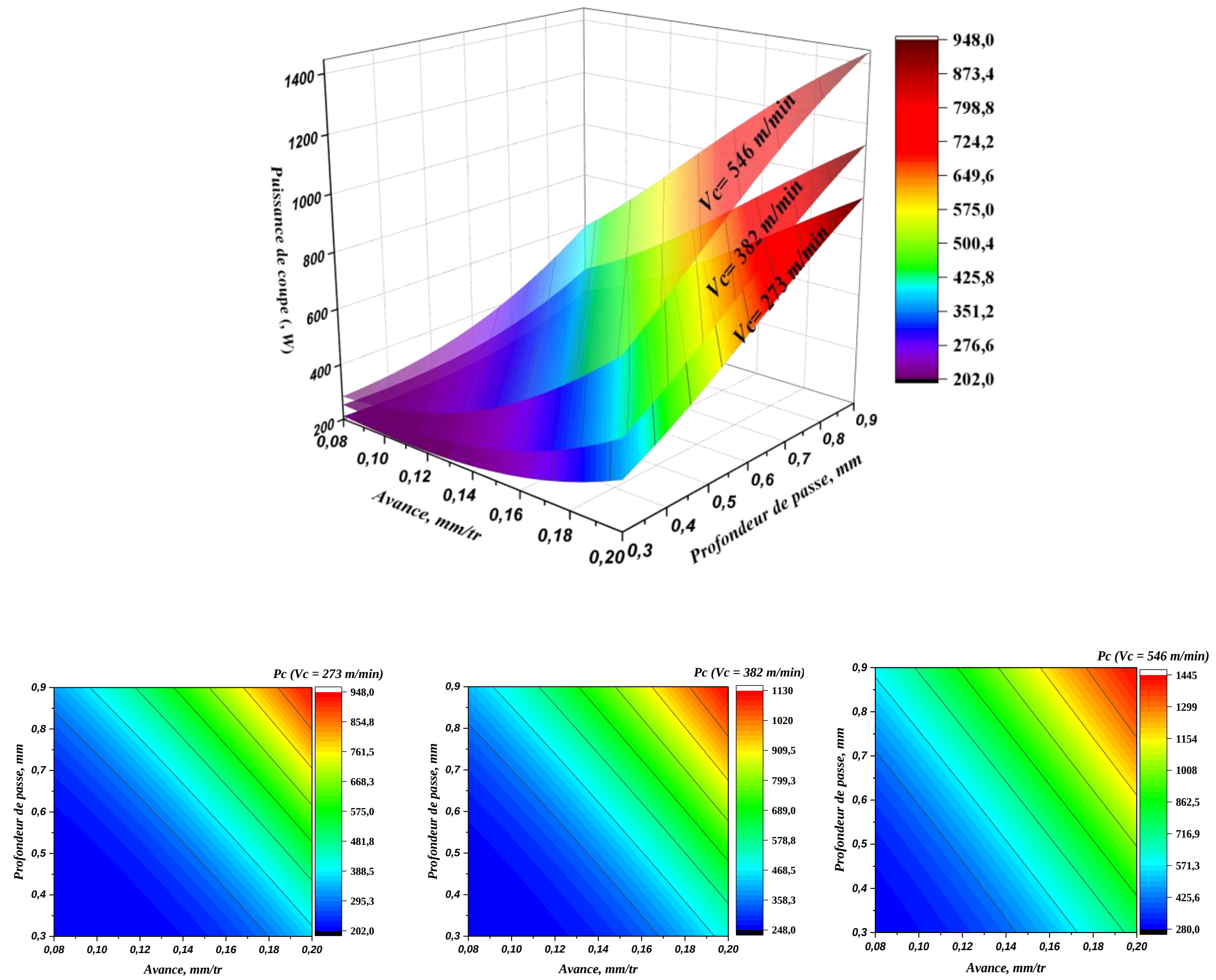


Figure IV. 24 *Courbes 3D et Les graphes de contour sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur Pc par la méthode RNA.*

IV.6 Modélisation par la méthode du Système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS)

Le modèle de réseau adaptatif à base de système d'inférence floue est développé par Jang **[91]**. ANFIS est une technique qui incorpore les concepts de la logique floue dans les réseaux de neurones. La méthode ANFIS simule la relation entre l'entrée et la sortie d'un processus à travers un apprentissage hybride pour déterminer la distribution optimale des fonctions d'appartenances. Elle est basée sur les règles floues « Si…..Alors » de Takagi et Sugeno **[92]**. L'architecture équivalente du modèle comporte cinq couches, chacune comportant plusieurs nœuds (**Figure IV. 25**). Les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres, alors que les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres dans le système. Les cinq couches utilisées pour l'apprentissage des paramètres sont **[93]**:

Couche 1: Les nœuds de cette couche représentent des nœuds d'entrée et sont également appelés nœuds adaptatifs. Le niveau d’appartenance est généré par les nœuds de cette couche à l'aide de fonctions: $\begin{Bmatrix} O_i^1 = u_{Ai}(x) & i = 1{,}2 \\ O_i^2 = u_{Bi}(x) & i = 1{,}2 \end{Bmatrix}$ (IV.23)

Où $O^1{}_i$ et $O^2{}_i$ sont les niveaux d'appartenance flous utilisés pour spécifier le degré d’appartenance des entrées nettes x et y en termes de valeurs linguistiques Ai, et Bi. Ai et Bi sont des ensembles flous construits à l'aide de leurs fonctions d'appartenance u_{Ai} et u_{Bi}. La forme sélectionnée des fonctions d’appartenance est normalement la forme de (Gaussien, triangle, trapézoïdal) avec un maximum égal à 1 et un minimum égal à 0, comme il est défini dans les équations IV. 24, IV.25 et IV.26.

Triangulaire $\mu(x) = max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$ (IV.24)

Trapézoïdal $\mu(x) = max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-b}\right), 0\right)$ (IV.25)

Ou sous forme gaussienne avec la fonction : $\mu(x) = exp\left[-\left(\frac{a_i - c_i}{a_i}\right)^2\right]$ (IV.26)

Où {a, b, c, d, σ} est l'ensemble des paramètres. Pendant que les valeurs de ces paramètres changent, les fonctions en forme précédente changent en conséquence, de ce fait présenter de diverses formes de fonction d’appartenance sur la variable linguistique Ai. Les paramètres dans cette couche désigner sous le nom des paramètres de fonction d’appartenance. Dans notre cas on a utilisé la forme Triangulaire comme fonction d’appartenance.

Couche 2: Chaque nœud de cette couche est un nœud fixe portant l’étiquette Π et qui multiplie les signaux entrants et génère le produit wi. Par exemple,

$(w_i) = \mu_{Ai}(x) \times \mu_{Bi}(y)$, pour i = 1, 2 (IV.27)

La sortie de chaque nœud de cette couche représente le poids d’une règle.

Couche 3: Cette couche contient des nœuds fixes étiquetés N qui permettent de calculer le rapport entre le poids de la règle et la somme des poids de toutes les règles, également ce rapport $\overline{wi}$ est appelé le poids normalisé de la règle:

$\overline{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad ou\ i = 1{,}2 \ldots$ (IV.28)

Couche 4: Cette couche contient les nœuds adaptatifs. La sortie de chaque nœud est simplement le produit du poids normalisé avec un polynôme de premier ordre (pour un SFIM (sugeno fuzzy inference model) du premier ordre). Les sorties de la couche 4 sont définies par:

$$\overline{w_i}f_i = \overline{w_i}(p_i x + q_i y + r_i) \qquad i = 1,2 \tag{IV.29}$$

Où $\overline{wi}$ est la sortie de la couche 3 et p_i, q_i et r_i sont appelés paramètres conséquents.

Couche 5: Il n'y a qu'un seul nœud dans cette couche. C'est un nœud fixe qui est étiqueté Σ. Comme son étiquette l'indique, il effectue la somme de tous les signaux entrants. Par conséquent, la sortie globale du modèle est définie par:

$$sortie\ globale = \sum_i \overline{w_i}f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \tag{IV.30}$$

Où f_i w_i est la relation de défuzzification entre les paramètres d'entrée et de sortie. Elle est calculée sur la base de la somme de tous les signaux d'entrée. Les règles floues sont ensuite définies sur la base du modèle flou de Sugeno. Dans cette étude, un total de 27 règles a été défini avec des règles "SI" et "ALORS" communes.

règle 1: *si x est* A_1 *et y est* B_1 *Alors* $f_1 = p_1x + q_1 y + r_1$,
règle 2: *si x est* A_2*et y est*B_2 *Alors* $f_2 = p_2x + q_2 y + r_2$,
règle 3:………..
règle 27: ….….

Où x et y sont les entrées, et A_1, A_2, B_1 et B_2 sont les ensembles flous qui représentent des valeurs linguistiques telles que petit, moyen, grand. Ces ensembles flous seraient déterminés au cours du processus d'apprentissage. p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2 sont des paramètres de conception également déterminés au cours du processus d'apprentissage. La **figure IV.25** présente l'architecture ANFIS

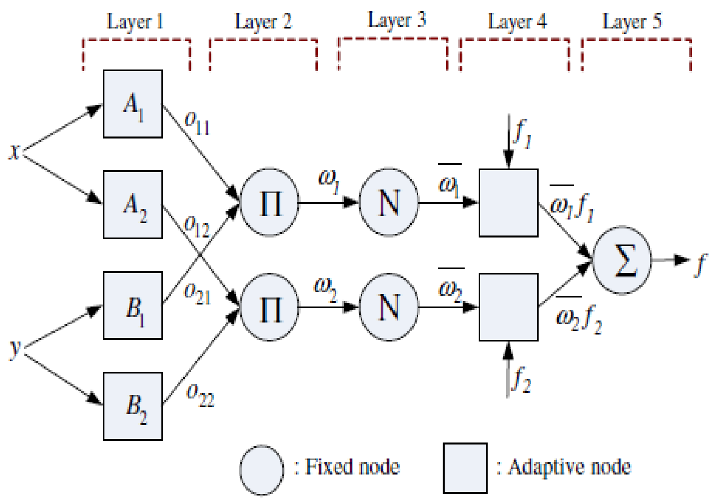


***Figure IV. 25** structure des couches ANFIS [94].*

IV.6.1 Modélisation de *Fz* par ANFIS

Le développement des modèles ANFIS a été effectué à l'aide de la boîte à outils Matlab R2014b pour la caractéristique de paramètre de sortie (*Fz*). Le modèle ANFIS développé se compose de trois variables d'entrée (*Vc*, *f* et *Doc*) et d'une seule variable de sortie (*Fz*), puis le modèle développé a été entraîné (apprentissage). Le tableau IV.13 décrit les détails de l'apprentissage des modèles. La structure ANFIS adoptée avec la fonction d'appartenance 'trimf' (triangular mumbership function) contient 27 ensembles de règles qui sont créées selon l'entrée servie au modèle. Les résultats d'expérimentation évalués ont été normalisés et considérés comme des données d'entrée pour faire évoluer la structure ANFIS souhaitée. La **figure IV. 26** montre l'éditeur de la méthode ANFIS sur Matlab avec la courbe de l'apprentissage de l'erreur. La structure du modèle ANFIS pour (*Fz*) est présentée dans la **figure IV. 27**. La **figure IV.28** montre la défuzzification pour prédire la sortie (*Fz*).

***Tableau IV. 13** Paramètres de formation pour le modèle ANFIS.*

Nombre de fonctions d' appartenance à chaque niveau d'entrée	3 3 3
Type de fonction d' appartenance pour les variables d'entrée	trimf
Type de fonction d'adhésion pour les variables de sortie	constant
Méthode de l'optimisation	Hybride
Tolérance de l'erreur	0.0000088
Nombre d'époques	100

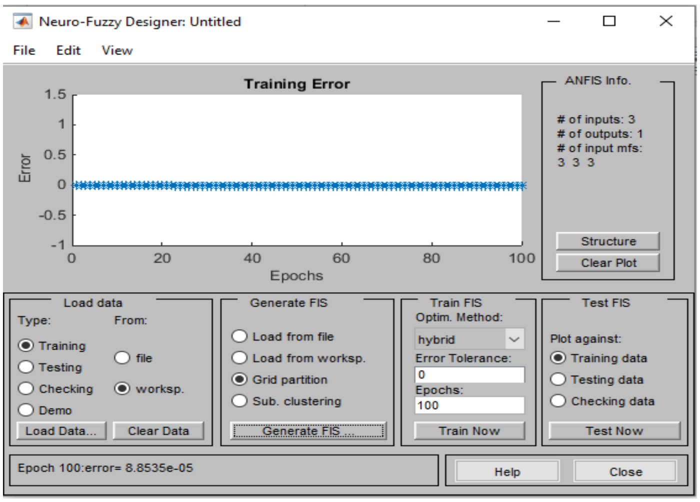


Figure IV. 26 *Apprentissage du système ANFIS pour Fz.*

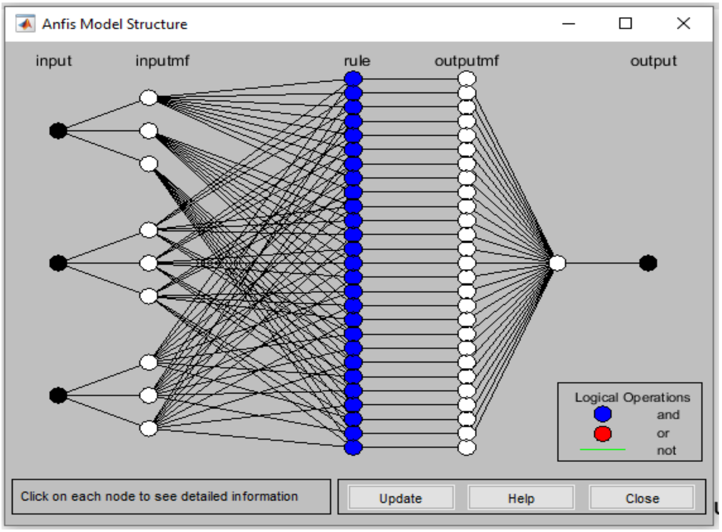


Figure IV. 27 *Structure du système ANFIS pour Fz.*

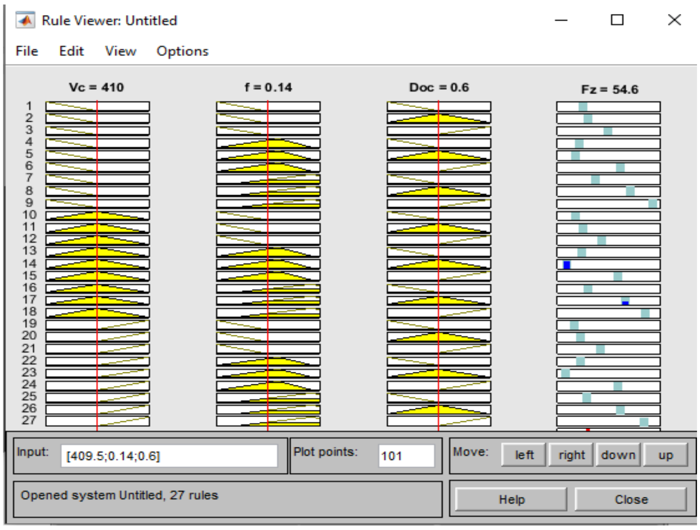


Figure IV. 28 *Défuzzification de la variable de sortie (Fz).*

Les **figures IV.29 (a, b et c)** illustrent les courbes de surface en 3D de l'effort de coupe (*Fz*) en fonction des variables d'entrée (*Vc*, *f* et *Doc*) obtenues par la méthode ANFIS. Les figures montrent l'influence de l'avance et profondeur de passe sur l'effort tangentiel, il est clair quand les valeurs de (*f* et *Doc*) sont plus élevées donc les valeurs de *Fz* sont plus grandes.

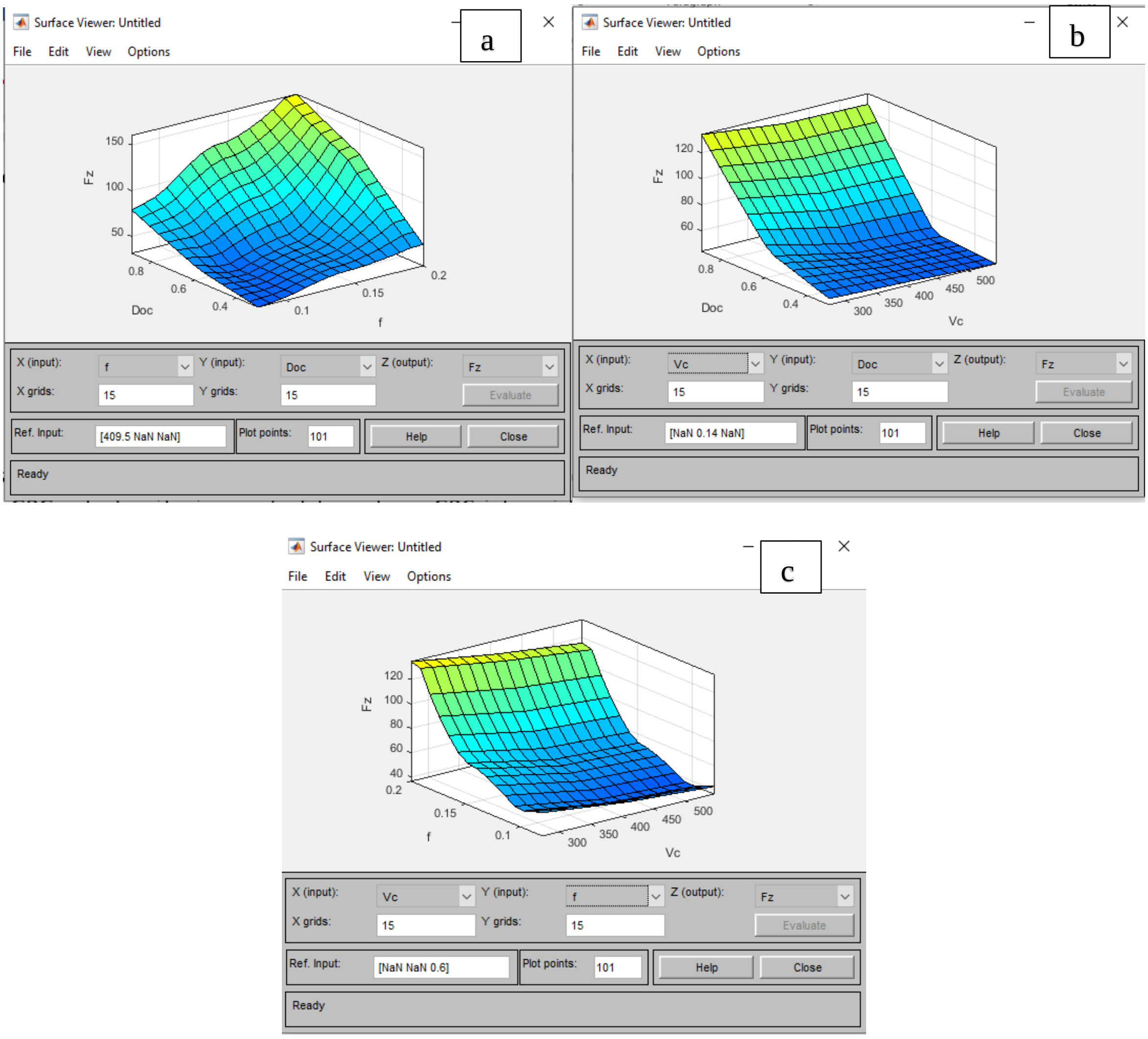


Figure IV. 29 *Courbes 3D sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur Fz par la méthode ANFIS.*

La **figure IV.30** présente la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes de l'effort de coupe (*Fz*) et celles prédites par la méthode ANFIS. Les résultats montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont confondues (R^2=1).

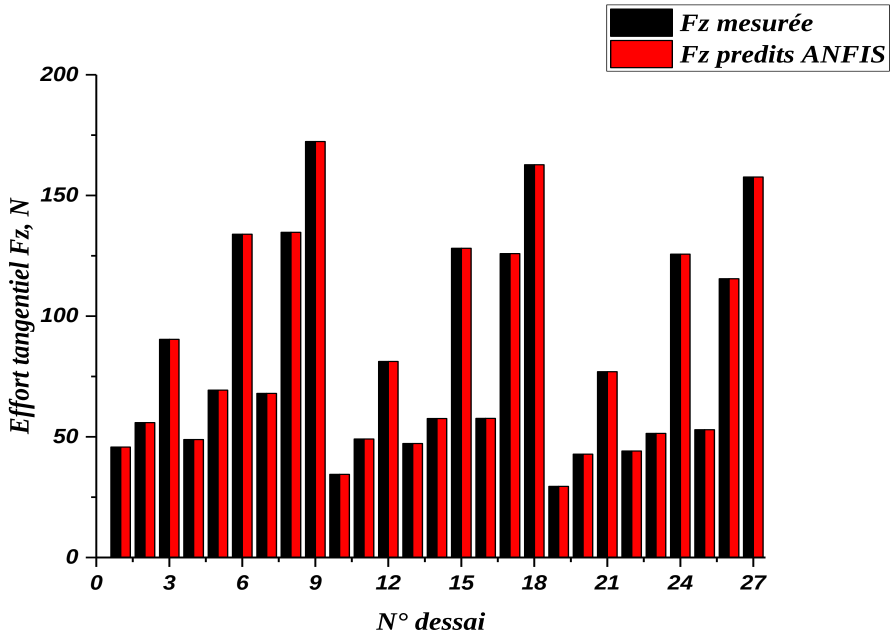


Figure IV. 30 *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Fz).*

IV.6.2 Modélisation de *Ra* par ANFIS

De même façon, la modélisation de la rugosité de surface (*Ra*) par la méthode ANFIS a été effectué à l'aide de Matlab. Le modèle ANFIS obtenue se compose de trois paramètres d'entrée (*Vc*, *f* et *Doc*) et d'un paramètre de sortie (*Ra*), puis le modèle développé a été entraîné. La structure ANFIS adoptée avec la fonction d'appartenance 'trimf' qui contient 27 règles de floue qui sont créées selon les variables d'entrée. Les résultats d'expérimentation évalués ont été normalisés et considérés comme des données d'entrée pour faire évoluer la structure ANFIS souhaitée. La **figure IV.31** montre l'éditeur ANFIS et la **figure IV.32** montre la structure du modèle ANFIS adopté pour prédire (*Ra*) en fonction des différentes conditions d'entrée. Le défuzzification de règles ANFIS pour prédire la sortie désirée est affiché dans la **figure IV.33**.

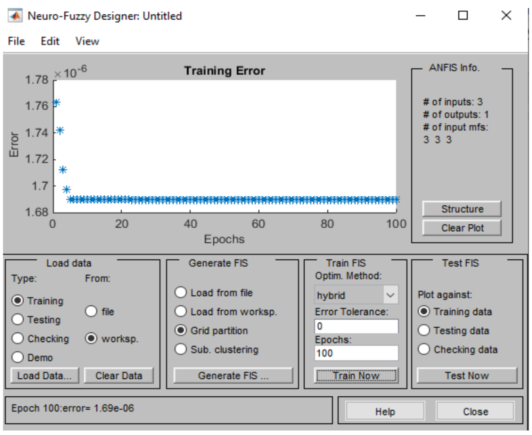


Figure IV. 31 *Apprentissage du système ANFIS pour Ra.*

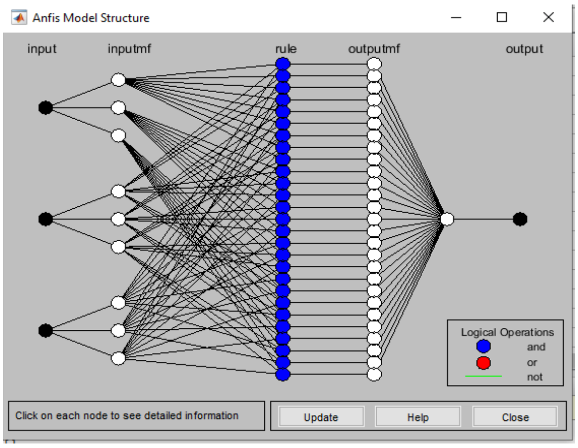


Figure IV. 32 *Structure du système ANFIS pour Ra.*

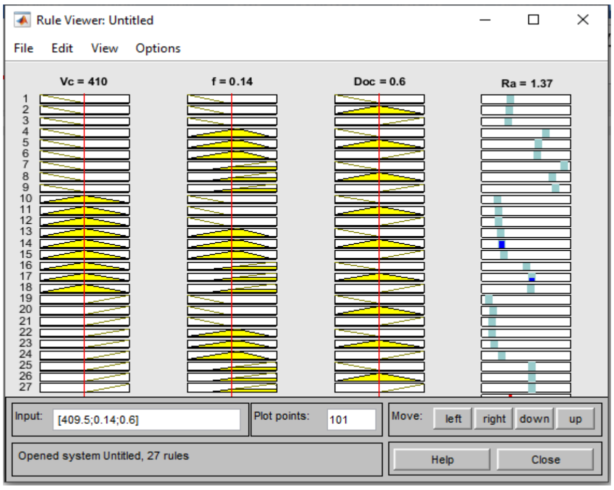
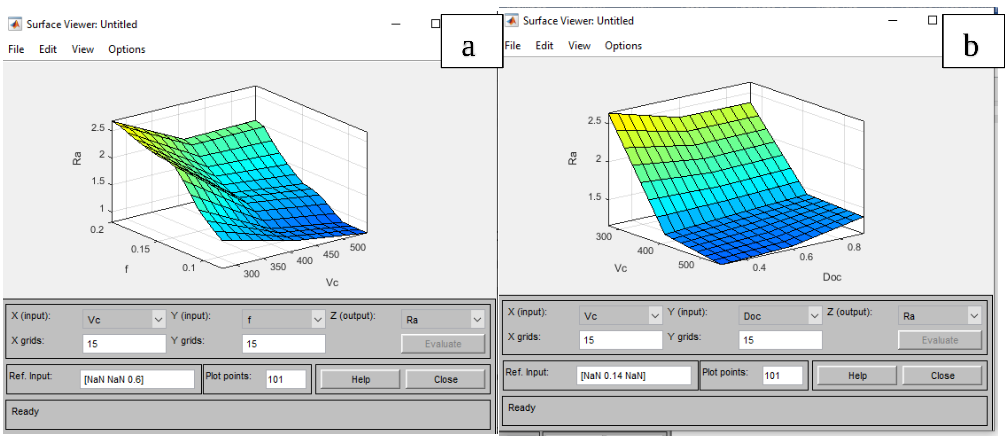


Figure IV. 33 *Défuzzification de la variable de sortie (Ra).*

Les **figures IV.34** (a, b et c) illustrent les courbes de surface en 3D de rugosité de surface (*Ra*) en fonction des variables d'entrée (*Vc*, *f* et *Doc*) obtenues par la méthode ANFIS. Les figures montrent l'influence significative de l'avance (*f*) sur la rugosité, par contre, la profondeur de passe à une légère influence sur *Ra*. Il est clair aussi depuis ces figures que la vitesse de coupe améliore la qualité de surface.



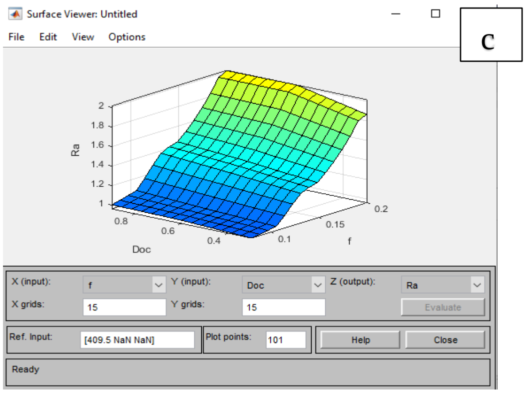


Figure IV. 34 *Courbes 3D sur l'effet de (Vc, f et Doc) sur Fz par la méthode ANFIS.*

La **figure IV.35** montre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par la méthode ANFIS et les valeurs mesurées du critère de rugosité de surface (*Ra*). On remarque que les valeurs prédites des critères de rugosité de surface sont parfaitement confondues avec les valeurs enregistrées expérimentalement puisque le R^2=1.

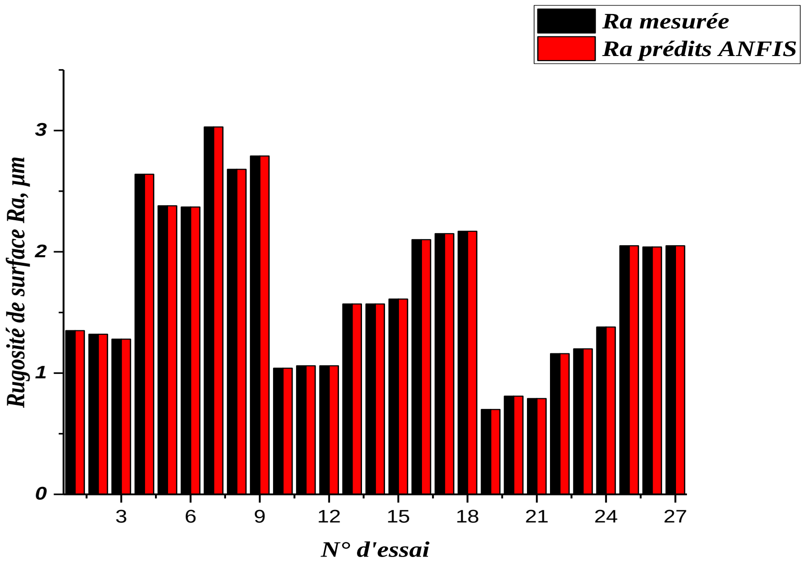


Figure IV. 35 *Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra)*

IV.7 Comparaison des résultats obtenus par les *RSM et RNA.*

Afin de bien évaluer les capacités prédictives des modèles construits par les deux méthodes *MSR* et *RNA*, une comparaison entre les prédicteurs a été réalisée. Les prédicteurs choisis sont : la racine moyenne des erreurs carrées (*RMSE*), d'erreur absolue moyenne (*MAD*) et le coefficient de détermination(R^2). Les formules de différents critères d'erreurs utilisés sont **[95]** :

- Erreur absolue moyenne : $MAD = \sum_{i=1}^{n} \frac{|E_t - P_t|}{n}$ (IV.31)

- Racine de la moyenne des carrées des erreurs: $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(E_t - P_t)^2}{n}}$ (IV.32)

- Coefficient de détermination : $R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{n}(P_t - E_t)^2}{\sum_{t=1}^{n}(P_t - Y_e)^2}$ (IV.33)

Ou n est le nombre d'expériences, E_t est la valeur expérimentale de la t^{ième} expérience, P_t est la valeur prédite de la t^{ième} expérience par le modèle, et Y_e est la valeur moyenne des valeurs mesurées.

Les tableaux (IV.14 et IV.15) présentent les valeurs de *MAD, RSME* et R^2 des modèles mathématiques obtenues à l'aide de la méthode de surface de réponse (*MSR*) et l'approche des réseaux de neurones artificiels (*RNA*) pour les paramètres de sortie (*Fx, Fy* et *Fz), (Ra, Rz et Rt) et Pc*. Les résultats des tableaux montrent clairement que les modèles issus de (*RNA*) donnent des bons résultats par rapport aux modèles issus par (*MSR*). On note que *MAD* pour les valeurs prédites des composantes de l'effort de coupe et la puissance de coupe par (*MSR*) était de 2.77, 5.14, 6.71 et 48.34 respectivement, et de 1.60, 0.94, 1.63 et 11.95 pour les valeurs prédites par (*RNA*). Pour la racine moyenne des erreurs carrées (*RSME*), on constate que les modèles (*RNA*) présentent des faibles valeurs de *RSME* (1.87 pour *Fx*, 1.51 pour *Fy*, 0.76 pour *Fz* et 48.247 pour *Pc*) en comparaison des modèles (*MSR*) (3.36, 5.98, 8.43 et 62.785 pour (*Fx*, *Fy*, *Fz* et *Pc*) respectivement). D'autre part, la racine moyenne des erreurs carrées pour les modèles obtenus par (*RNA*) des critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) sont (0.106, 0.136 et 0.196), et les valeurs de *RSME* pour les modèles (*MSR*) de (*Ra, Rz* et *Rt*) sont (0.15, 0.54 et 0.65) respectivement. On remarque aussi que tous les modèles obtenus par l'approche (*RNA*) présentent un coefficient de détermination(R^2) très proche à l'unité (R^2 varie entre 0.9924, 0.9987, 0.9987 pour (*Fx, Fy et Fz*), et R^2=0.9761 pour *Pc*), alors que les R^2 des modèles obtenus par (*MSR*) sont R^2 = 0.9763 pour *Fx*, R^2=0.9706 pour *Fy* R^2=0.9613 pour *Fz* et R^2=0.9606 pour (*Pc*). D'autre part, le coefficient de détermination pour les modèles obtenus par (*RNA*) des critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) sont (0.9870, 0.9971 et 0.9947), et les valeurs de R^2 pour les modèles (*MSR*) de *Ra*, *Rz* et *Rt* sont (0.9562, 0.9701 et 0.9605) respectivement

Tableau IV. 14 *Comparaison entre (MSR) et (RNA) pour (Fx, Fy, Fz et Pc).*

	Fx		***Fy***		***Fz***		***Pc***	
	MSR	***RNA***	***MSR***	***RNA***	***MSR***	***RNA***	***MSR***	***RNA***
MAD	2.77	1.60	5.14	0.94	6.71	1.63	48.34	11.95
RMSE	3.36	1.87	5.98	1.51	8.43	0.76	62.79	48.24
R²	0.9763	0.9924	0.9706	0.9987	0.9613	0.9987	0.9606	0.9761

Tableau IV. 15 *Comparaison entre (MSR) et (RNA) pour (Ra, Rz et Rt).*

	Ra		***Rz***		***Rt***	
	MSR	***RNA***	***MSR***	***RNA***	***MSR***	***RNA***
MAD	0.118	0.0644	0.44	0.09	0.55	0.14
RMSE	0.15	0.106	0.54	0.13	0.65	0.19
R^2	0.9562	0.9870	0.9701	0.9971	0.9605	0.9961

IV.7.1 Comparaison pour les composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*)

Le tableau IV.16 présente une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux estimés par les modèles (*MSR*) et (*RNA*) pour les composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) pour les 27 essais. On remarque que l'erreur entre le modèle (*RNA*) et les résultats expérimentaux est entre (0.08 et 7.74%) pour (*Fx*), (0.01 et 2.03) % pour (*Fy*) et (0.01 et 8.30) % pour (*Fz*). Le pourcentage d'erreur pour le modèle (*MSR*) se trouve entre (0.31 et 10.41) % pour (*Fx*), (0.23 et 15.58) % pour (*Fy*) et (0.09 et 12.79) % pour (*Fz*).

Tableau IV. 16 *Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par MSR et RNA pour l'effort de coupe.*

	Effort de coupe *Fx* (N)				Effort de coupe *Fy* (N)				Effort de coupe *Fz* (N)			
N° of test	Préd (MSR)	Préd (RNA)	Erreur% (MSR)	Erreur % (RNA)	Préd (MSR)	Préd (RNA)	Erreur% (MSR)	Erreur% (RNA)	Préd (MSR)	Préd (RNA)	Erreur% (MSR)	Erreur% (RNA)
1	13.78	14.31	6.03	4.14	35.37	41.30	8.32	0.59	41.57	45.76	4.81	0.01
2	34.46	32.55	9.41	6.58	67.20	58.58	8.10	1.25	57.41	56.92	1.36	0.93
3	66.63	69.54	3.15	1.01	83.50	84.95	1.36	0.50	90.23	89.29	0.09	0.61
4	21.35	20.18	8.16	5.34	56.61	47.01	9.71	0.45	49.71	49.69	0.85	0.83
5	43.35	47.21	5.52	1.27	96.29	101.72	3.36	0.62	80.15	67.10	7.22	1.65
6	76.84	76.74	0.64	0.57	120.44	126.10	2.31	0.01	127.56	134.70	2.44	0.29
7	24.42	24.55	1.47	1.21	68.81	73.34	3.32	0.13	73.51	68.06	3.88	0.03
8	47.75	49.22	3.74	2.23	116.33	113.72	1.86	0.73	118.53	134.92	6.39	0.08
9	82.56	76.96	3.43	0.08	148.33	145.31	0.50	0.53	180.55	175.87	2.33	1.02
10	9.54	12.08	8.75	3.04	26.12	34.39	14.39	0.74	33.63	34.48	1.17	0.07
11	27.08	22.72	6.36	2.41	57.62	52.14	4.78	0.21	49.47	48.55	0.35	0.58

12	56.11	54.94	2.77	1.72	73.60	72.86	0.88	0.38	82.29	82.29	0.64	0.64
13	17.63	18.95	4.13	7.74	47.98	38.33	12.93	1.78	41.35	46.25	6.62	1.04
14	36.49	37.84	4.19	2.37	87.34	94.26	3.65	0.16	71.79	59.90	10.96	1.96
15	66.84	67.80	3.66	2.95	111.17	115.48	0.23	1.67	119.20	127.81	3.60	0.12
16	21.22	20.06	0.42	3.23	60.81	65.34	4.08	0.49	64.73	54.60	5.82	2.68
17	41.41	40.42	4.40	3.19	108.01	107.47	0.78	1.03	109.75	120.18	6.86	2.33
18	73.08	75.25	0.60	0.87	139.69	134.77	1.91	0.12	171.77	162.36	2.70	0.11
19	8.05	9.82	10.41	0.49	18.36	24.56	12.49	2.00	29.00	29.42	0.80	0.08
20	20.87	22.98	0.31	5.12	49.38	46.32	3.84	0.64	44.84	42.46	2.32	0.40
21	45.18	46.55	2.72	1.23	64.87	61.03	1.95	1.10	77.65	74.45	0.42	1.68
22	16.93	15.52	6.44	2.10	41.17	28.87	15.58	2.03	36.09	52.07	9.98	8.30
23	31.07	31.60	2.82	1.98	80.04	87.04	4.26	0.07	66.52	59.31	12.79	7.12
24	56.70	51.32	7.07	2.10	103.38	108.21	2.59	0.31	113.93	125.18	4.91	0.21
25	21.31	19.57	0.70	4.97	54.94	58.89	1.59	1.88	58.83	52.81	5.26	0.13
26	36.78	36.56	1.36	1.06	101.66	103.10	0.55	0.15	103.86	115.61	5.31	0.04
27	63.73	66.42	3.16	1.10	132.85	129.16	1.35	0.06	165.87	157.85	2.54	0.07

Les **figures IV.36 (a, b et c)** illustrent la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par les modèles (*RSM*) et (*ANN*) de (*Fx, Fy et Fz*) par rapport aux résultats expérimentaux. On remarque que la courbe du modèle obtenu par (*MSR*) des composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) et celle-ci obtenu par le modèle des (*RNA*) sont approximativement confondues avec la courbe des valeurs expérimentales exceptée à quelques points d'essai où nous pouvons noter une divergence. Comme on peut aussi remarquer que les valeurs données par le modèle des réseaux de neurones artificiels sont plus proches aux valeurs expérimentales que celles données par le modèle de la méthodologie des surfaces de réponse. Pour cela on peut dire que les modèles des (*RNA*) sont proches aux modèles développés par (*MSR*).

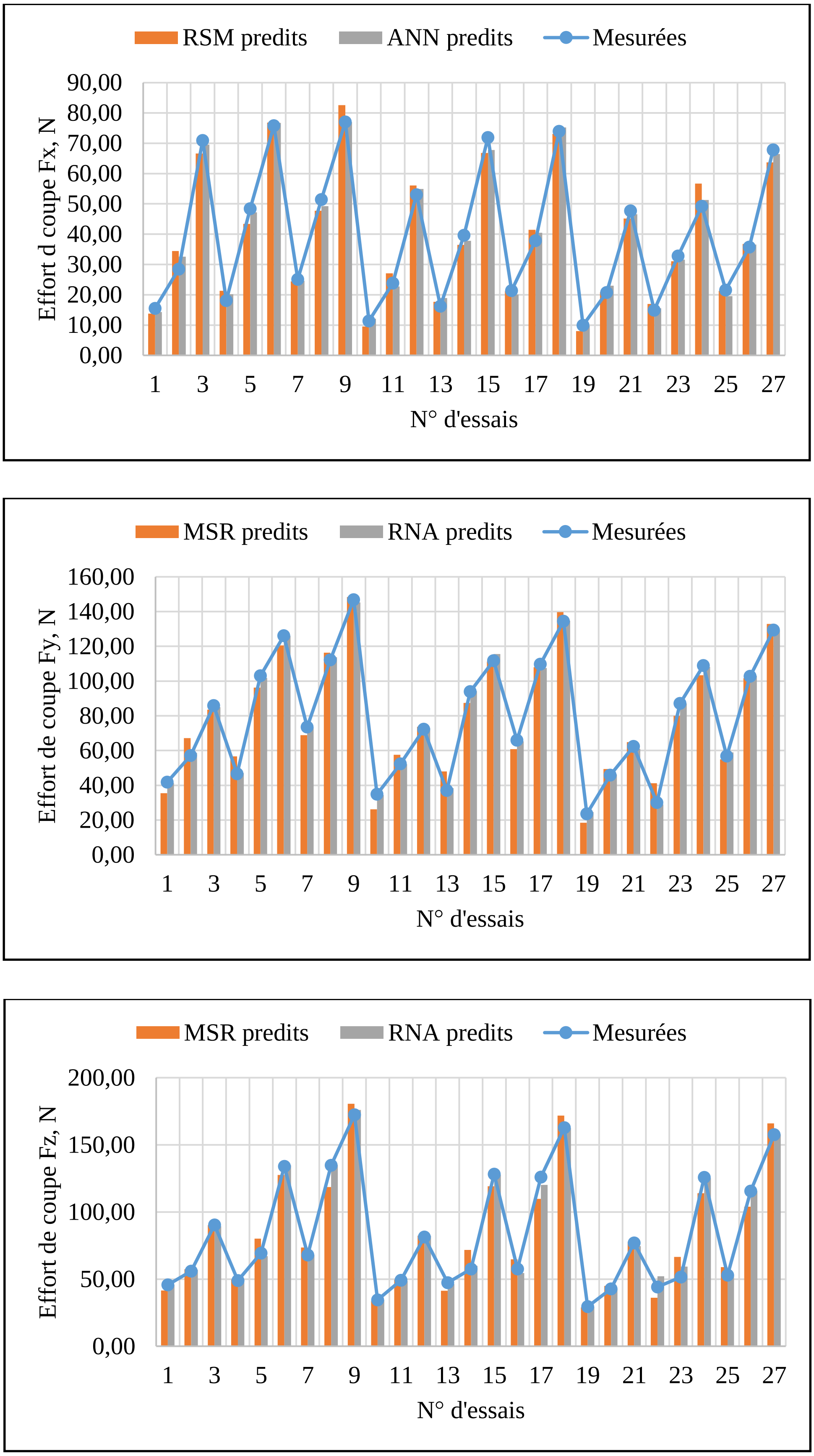


Figure IV. 36 *Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (MSR et RNA) pour (Fx, Fy et Fz)*

IV.7.2 Comparaison pour les critères de rugosité de surface (*Ra, Rz* et *Rt*)

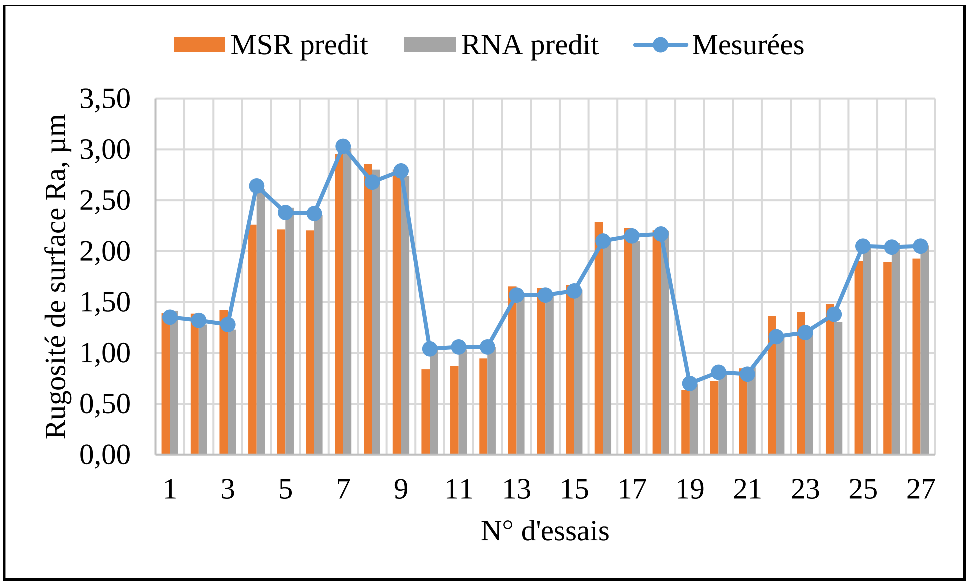
Le tableau IV.17 présente une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédits par les modèles (MSR) et (RNA) pour les critères de rugosité de surface (*Ra, Rz et Rt*) pour les 27 essais. On constate que l'erreur entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédits par les modèles de RNA est entre (0.16 et 4.15) % pour (*Ra*), (0.03 et 2.33) % pour (*Rz*) et (0.02 et 3.77) % pour (*Rt*). Le pourcentage d'erreur entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédits par les modèles de (*MSR*) se trouve entre (0.23 et 10.67) % pour (*Ra*), (0.13 et 5.29) % pour (*Rz*) et (0.04 et 4.90) % pour (*Rt*). Par conséquent, les deux modèles de prédiction (*MSR*) et (*RNA*) sont presque compatibles en terme erreur.

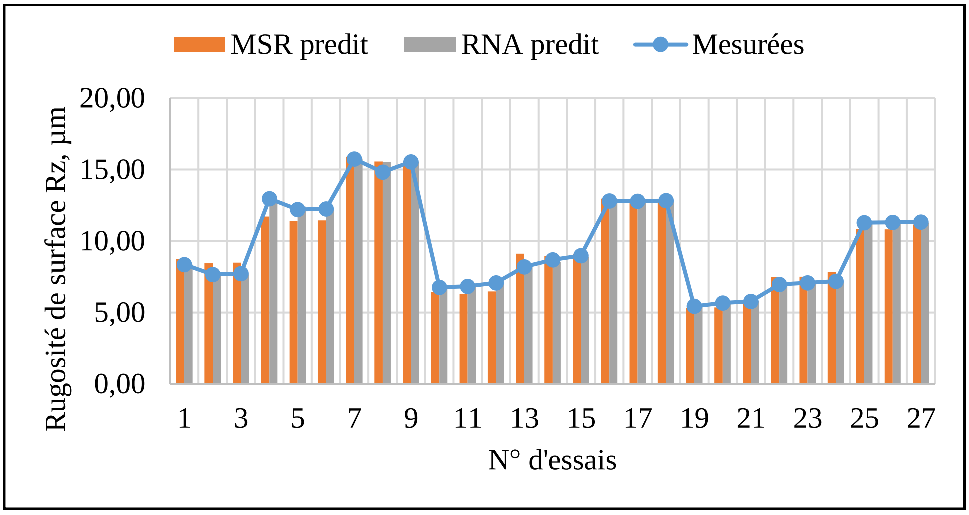
***Tableau IV. 17** Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par (MSR) et (RNA) pour les critères de rugosité.*

	Rugosité de surface *Ra* (µm)				Rugosité de surface *Rz* (µm)				Rugosité de surface *Rt* (µm)			
N° of test	Pred (MSR)	Pred (RNA)	Error% (MSR)	Error% (RNA)	Pred (MSR)	Pred (RNA)	Error% (MSR)	Error% (RNA)	Pred (MSR)	Pred (RNA)	Error% (MSR)	Error% (RNA)
1	1.39	1.41	1.38	2.29	8.73	8.34	2.25	0.03	10.78	10.56	2.00	0.97
2	1.38	1.28	2.40	1.62	8.44	7.76	4.79	0.60	10.83	10.31	1.92	0.54
3	1.42	1.23	5.30	2.03	8.49	7.66	4.70	0.47	10.91	10.13	0.04	3.77
4	2.26	2.61	7.71	0.53	11.72	12.88	5.05	0.35	13.91	13.89	0.90	0.95
5	2.21	2.43	3.65	1.00	11.41	12.41	3.42	0.77	13.97	13.67	2.18	1.11
6	2.20	2.36	3.62	0.29	11.45	12.33	3.39	0.31	14.06	13.41	2.49	0.10
7	2.95	3.02	1.27	0.24	15.90	15.77	0.47	0.06	17.94	18.40	0.81	0.48
8	2.86	2.80	3.21	2.21	15.57	15.53	2.48	2.33	18.01	18.82	2.63	0.43
9	2.80	2.74	0.23	0.92	15.59	15.53	0.13	0.07	18.12	19.05	1.59	0.93
10	0.84	1.04	10.67	0.16	6.46	6.69	2.28	0.52	8.10	8.60	1.93	1.08
11	0.87	1.03	9.76	1.24	6.29	6.87	4.08	0.28	8.18	8.49	1.62	0.23
12	0.94	1.05	5.76	0.26	6.47	7.27	4.48	1.35	8.30	8.40	1.91	1.30
13	1.65	1.58	2.60	0.34	9.12	8.40	5.29	1.21	10.69	11.31	3.19	0.34
14	1.64	1.56	2.16	0.35	8.93	8.52	1.38	0.96	10.78	11.54	3.54	0.11
15	1.67	1.62	1.70	0.35	9.09	8.86	0.58	0.71	10.91	12.02	4.90	0.03
16	2.29	2.12	4.25	0.37	12.96	12.81	0.55	0.04	14.17	12.98	4.24	0.16
17	2.22	2.10	1.71	1.23	12.76	12.77	0.15	0.10	14.28	13.11	4.23	0.03
18	2.20	2.20	0.79	0.70	12.91	12.85	0.29	0.08	14.42	13.29	4.42	0.34
19	0.64	0.69	4.60	0.61	5.33	5.43	0.95	0.03	7.18	7.20	0.68	0.58
20	0.72	0.78	5.71	1.78	5.35	5.63	2.86	0.37	7.31	7.31	0.22	0.18
21	0.85	0.86	3.52	4.15	5.72	5.79	0.49	0.10	7.48	7.43	1.07	0.72
22	1.36	1.16	8.04	0.21	7.49	6.91	3.64	0.37	8.95	8.24	3.97	0.17
23	1.40	1.25	7.71	1.93	7.49	7.14	2.84	0.43	9.10	8.73	2.17	0.11

24	1.48	1.30	3.46	2.88	7.85	7.17	4.37	0.17	9.27	8.89	2.91	0.79
25	1.91	2.03	3.66	0.48	10.83	11.24	2.11	0.29	11.63	12.22	2.48	0.02
26	1.90	2.08	3.66	0.99	10.82	11.43	2.19	0.53	11.78	12.43	2.27	0.39
27	1.93	2.06	3.07	0.16	11.16	11.29	0.76	0.19	11.97	12.46	2.23	0.24

Les **figures IV.37 (a, b et c)** montrent la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par les modèles (*MSR* et *RNA*) de (*Ra*, *Rz et Rt*) par rapport aux résultats expérimentaux. On remarque que les résultats obtenus par les deux méthodes (*MSR* et *RNA*) concernant (*Ra*, *Rz et Rt*) sont approximativement confondues avec les résultats expérimentaux, à l'exception de quelques points d'essai où nous pouvons noter une divergence.





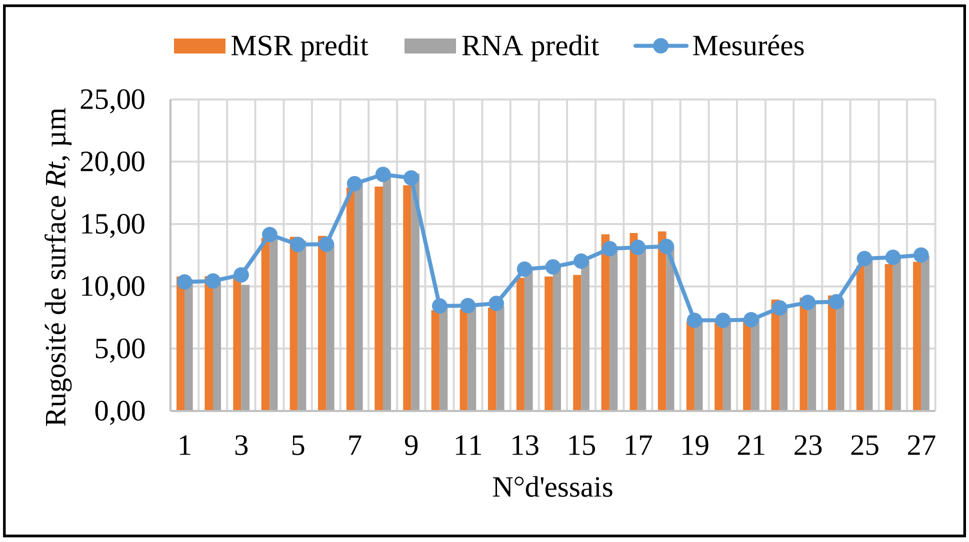


***Figure IV. 37** Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (MSR et RNA) pour (Ra, Rz et Rt)*

IV.7.3 Comparaison pour la puissance de coupe (*Pc*)

La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédits obtenues par les modèles (*MSR* et *RNA*) pour la puissance de coupe (*Pc*) pour les 27 essais est présentée dans le tableau IV.18. On constate que l'erreur entre le modèle (*RNA*) et les résultats expérimentaux est entre (0.01 et 2.89) %. Le pourcentage d'erreur pour le modèle (*MSR*) se trouve entre (0.27 et 14.89%).

Tableau IV. 18 Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par (*MSR*) et (*RNA*) pour (*Pc*).

N° of test	Pc Préd (*MSR*)	Pc Préd (*RNA*)	Erreur% (*MSR*)	Erreur% (*RNA*)
1	230.74	206.69	5.12	0.38
2	250.50	251.02	0.74	0.63
3	390.88	410.86	2.54	0.05
4	224.95	226.10	0.58	0.83

5	341.62	316.41	3.97	0.14
6	578.91	605.24	2.56	0.34
7	316.15	306.39	1.07	0.50
8	529.73	616.23	7.28	0.27
9	863.94	781.94	4.85	0.14
10	220.50	232.25	0.30	2.89
11	311.07	309.64	0.27	0.50
12	522.27	516.01	0.48	0.12
13	266.27	295.61	6.06	0.84
14	453.75	366.52	10.61	0.03
15	761.86	821.63	3.41	0.37
16	409.02	366.88	5.45	0.01
17	693.42	793.29	7.24	0.53
18	1098.44	1051.77	2.93	0.76
19	214.43	270.73	11.14	0.47
20	411.55	389.89	2.75	0.05
21	729.28	703.20	2.00	0.18
22	337.77	398.72	8.59	0.31
23	631.79	468.78	14.89	0.08
24	1046.44	1141.07	4.45	0.12
25	558.09	479.26	7.33	0.27
26	949.03	1054.42	5.11	0.16
27	1460.59	1432.73	0.90	0.06

La **figure IV.38** montre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues par les modèles (*MSR*) et (*RNA*) de (*Pc*) par rapport aux résultats obtenus expérimentalement. On note que la courbe du modèle obtenu par (*MSR*) de la puissance de coupe et celle obtenue par le modèle de (*RNA*) coïncident approximativement avec la courbe des valeurs expérimentales sauf en quelques points d'essai où l'on peut noter une divergence. Pour cela, nous pouvons dire que les modèles (*RNA*) sont proches des modèles développés par (*MSR*).

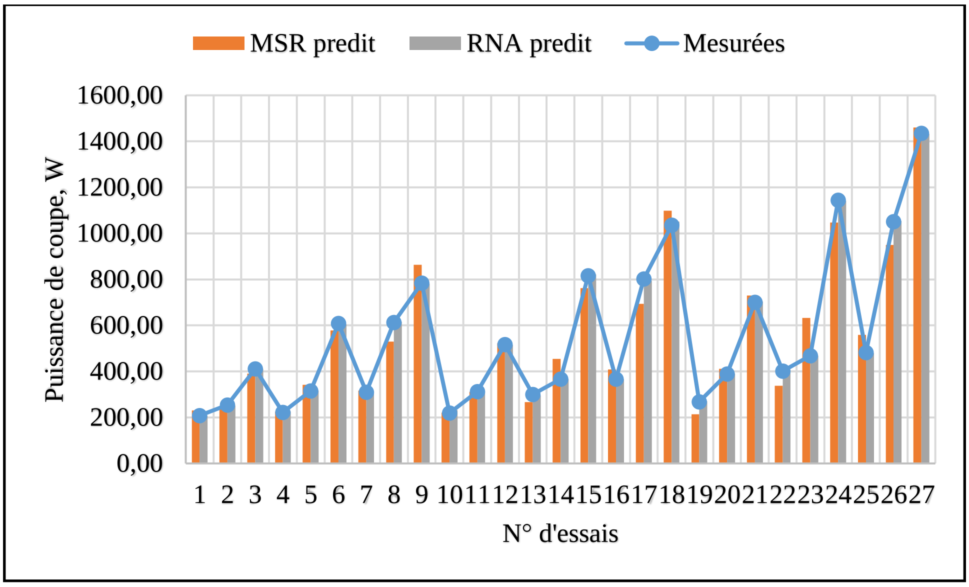


Figure IV. 38 *Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (MSR et RNA) pour (Pc).*

IV.7.4 Comparaison des résultats obtenus par les méthodes *ANFIS, RSM et RNA* pour *Fz et Ra*

Le tableau IV.19 présente les valeurs de *MAD*, *RSME* et *R²* des modèles mathématiques obtenues à l'aide des méthodes (*MSR*), (*RNA*) et (*ANFIS*) pour les paramètres de sortie (*Fz et Ra*). Il est clair que les modèles issus de (*ANFIS*) donnent des bons résultats par rapport aux modèles issus par (*MSR*) et (*RNA*). On note qu'erreur absolue moyenne pour les valeurs prédites de (*Fz* et *Ra*) par (*ANFIS*) était de 0.0013 et 0.000026, respectivement. Pour la racine moyenne des erreurs carrées (*RSME*), on constate que la méthode (*ANFIS*) présente des très faibles valeurs de *RSME* (0.0018 pour *Fz* et 0.000032 pour *Ra*) en comparaison par les deux autres méthodes (*MSR*) et (ANFIS). D'autre part, le coefficient de détermination pour les modèles obtenus par (*ANFIS*) de (*Fz* et *Ra*) sont (1 et 1).

Tableau IV. 19 *Comparaison entre (ANFIS), (MSR) et (RNA) pour (Fz et Ra).*

	Fz			***Ra***		
	MSR	***RNA***	***ANFIS***	***MSR***	***RNA***	***ANFIS***
MAD	6.71	1.63	0.0013	0.118	0.0644	0.000026
RMSE	8.43	2.75	0.0018	0.15	0.04	0.000032
R²	0.9613	0.9972	1	0.9562	0.9869	1

Le tableau IV.20 présente une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédits par le modèle (*ANFIS*) pour (*Fz* et *Ra*) pour les 27 essais. On constate que l'erreur entre les résultats

expérimentaux et les valeurs prédits par les modèles de *ANFIS* est varié entre (0.00004 et 0.00237) % pour (*Fz*) et (0.00004 et 0.0022) % pour (*Ra*).

Tableau IV. 20 Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par (*ANFIS*) pour (*Fz* et *Ra*).

	Rugosité de surface *Ra* (µm)				Effort de coupe *Fz* (µm)			
N° of test	Préd (ANFIS)	Erreur % (ANFIS)	Erreur% (MSR)	Erreur% (RNA)	Préd (ANFIS)	Erreur % (ANFIS)	Erreur% (MSR)	Erreur% (RNA)
1	1.34996	0.0013	1.38	2.29	45.76877	0.0013	2.25	0.03
2	1.32000	0.0000	2.40	1.62	55.86996	0.0000	4.79	0.60
3	1.28003	0.0012	5.30	2.03	90.38223	0.0012	4.70	0.47
4	2.64001	0.0003	7.71	0.53	48.87023	0.0002	5.05	0.35
5	2.37998	0.0005	3.65	1.00	69.34941	0.0004	3.42	0.77
6	2.37009	0.0018	3.62	0.29	133.935	0.0019	3.39	0.31
7	3.03005	0.0009	1.27	0.24	68.01112	0.0008	0.47	0.06
8	2.67998	0.0003	3.21	2.21	134.709	0.0004	2.48	2.33
9	2.78995	0.0009	0.23	0.92	172.3169	0.0009	0.13	0.07
10	1.04000	0.0002	10.67	0.16	34.43015	0.0002	2.28	0.52
11	1.06005	0.0022	9.76	1.24	49.12232	0.0024	4.08	0.28
12	1.06000	0.0000	5.76	0.26	81.23991	0.0001	4.48	1.35
13	1.56998	0.0005	2.60	0.34	47.21929	0.0007	5.29	1.21
14	1.56998	0.0006	2.16	0.35	57.59924	0.0007	1.38	0.96
15	1.61000	0.0001	1.70	0.35	128.1102	0.0001	0.58	0.71
16	2.09998	0.0005	4.25	0.37	57.60926	0.0006	0.55	0.04
17	2.14998	0.0005	1.71	1.23	125.9187	0.0005	0.15	0.10
18	2.16997	0.0008	0.79	0.70	162.7171	0.0009	0.29	0.08
19	0.70002	0.0015	4.60	0.61	29.47092	0.0016	0.95	0.03
20	0.80999	0.0006	5.71	1.78	42.79945	0.0006	2.86	0.37
21	0.78998	0.0010	3.52	4.15	76.99841	0.0010	0.49	0.10
22	1.15995	0.0022	8.04	0.21	44.08811	0.0021	3.64	0.37
23	1.20001	0.0006	7.71	1.93	51.43058	0.0006	2.84	0.43
24	1.37996	0.0015	3.46	2.88	125.6962	0.0015	4.37	0.17
25	2.05003	0.0007	3.66	0.48	52.95087	0.0008	2.11	0.29
26	2.04003	0.0008	3.66	0.99	115.512	0.0009	2.19	0.53
27	2.04998	0.0004	3.07	0.16	157.6386	0.0005	0.76	0.19

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l’analyse de la variance ANOVA, l’analyse de régression et les réseaux de neurones ainsi que la méthode *ANFIS* lors du tournage conventionnel de la fonte grise EN-GJL-250 avec un outil en nitrure de bore cubique CBN7050 a permis d’obtenir des modèles mathématiques à la fois pour les composantes de l’effort de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*), pour les critères de la rugosité de surface (*Ra*, *Rt* et *Rz*) et pour la puissance de coupe (*Pc*), en fonction des paramètres d'usinage. L’étude réalisée dans ce chapitre a monté que les modèles trouvés par la méthodologie des surfaces de réponse, la méthode des réseaux de neurones artificiels et *ANFIS* sont tous les deux bien ajustés avec les valeurs expérimentales, mais les modèles issus des méthodes (*ANFIS*) et (*RNA*) sont plus précis. Aussi, ces modèles mathématiques trouvés représentent un intérêt industriel important, puisqu’ils permettent de faire des prédictions.

CHAPITRE V
Optimisation mono et multi-objectifs des paramètres d'usinage

V.1 Introduction

Dans l'industrie, le défi des fabricants de pièces mécaniques est le choix des conditions d'usinage les plus appropriées lors de l'usinage d'une grande variété de matériaux afin d'obtenir les résultats souhaités pour les paramètres technologiques désirés. Or, il est bien évident que le choix judicieux des conditions d'usinage est étroitement lié à la productivité en termes de temps technologique d'usinage et également au coût global d'une opération d'usinage.

Dans ce contexte, plusieurs techniques d'optimisation des paramètres d'usinage ont été utilisées pour le choix judicieux des conditions d'usinage, telles que les méthodes ; Taguchi, GRA, TOPSIS, GA, NSGA II, TLBO, DF, PSO, DEAR etc..... **[96-99]**.

Ce chapitre est consacré à la présentation de la démarche de l'application de deux méthodes d'optimisation ''mono et multi-objective'' sur un plan d'expérience de Taguchi L_{27} pour le couple de tournage (Fonte grise EN-GJL-250/ nitrure de bore cubique CBN7050), afin de déterminer les régimes optimaux. Les paramètres de coupe pris en compte lors de cette étude sont les suivants : la vitesse de coupe (*Vc*), l'avance *(f)* et la profondeur de passe *(Doc)* avec les paramètres technologiques de sorties qui sont : la rugosité de surface (*Ra)*, l'effort de coupe tangentiel (*Fz)*, la puissance de coupe (*Pc)* et le débit du coupeau enlevé (*MRR*). L'optimisation mono-objective a été effectuée en se basant sur l'approche de Taguchi basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (*S/N*). Par contre, l'optimisation multi-objective a été réalisée par les méthodes fonction de désirabilité (*DF*), l'analyse relationnelle grise (*GRA*), la technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale (*TOPSIS*), méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (*DEAR*) et Algorithme génétique de tri non dominé II (NSGA-II)

V.2 Méthode d'optimisation Mono-Objective de Taguchi

La technique de Taguchi est une méthode utile qui joue un rôle important dans l'amélioration des avantages des systèmes et la résolution des problèmes d'optimisation mono-objective pendant la production du produit, grâce à la mise en œuvre de la planification des expériences, qui sont basées sur l'utilisation de tableaux orthogonaux fournis par Taguchi.

L'objectif est de réduire le nombre d'essais et de se concentrer uniquement sur les expériences essentielles pour l'analyse, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les coûts **[100]**. En outre, cette méthode permet de contrôler simultanément les facteurs contrôlables et

incontrôlables en convertissant les réponses en rapport signal/bruit (*S/N*) pour identifier les performances du système **[101]**.

Le rapport signal/bruit (*S/N*) est le critère fondamental dans l'approche de Taguchi, il permet de définir le degré d'effet du bruit indésirable sur le signal voulu **[102]**. Taguchi **[100]** à recommandé l'utilisation des plans orthogonaux pour attribuer les facteurs choisis pour l'expérience.

La puissance de la méthode Taguchi, c'est qu'il intègre des méthodes statistiques dans le processus d'ingénierie. Bendell et al. **[103]** et Rowlands et al.**[104]** ont rapporté l'avantage de l'application de la méthode de Taguchi dans l'automobile, les plastiques, les semi-conducteurs, de la transformation des métaux, et de la fonderie industrielle.

Les rapports S/N sont généralement divisés en trois catégories données par les équations suivantes **[105]** :

- Nominale est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}}{S_y^2}\right) \quad \textbf{(V.1)}$$

- Plus grand est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = -10 * \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \quad \textbf{(V.2)}$$

- Plus petit est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = -10 * \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad \textbf{(V.3)}$$

Où $\bar{y}$ est la moyenne des données observées, S_y^2 est la variance de y, n est le nombre de tests et y_i est la valeur mesurée.

Le **tableau V.1** présente les résultats expérimentaux correspondants aux résultats de la rugosité de surface (*Ra*), de l'effort (*Fz*) de coupe, le débit du coupeau enlevé (*MRR*) et la puissance de coupe (*Pc*) avec les différentes combinaisons des paramètres de coupe, (*Vc*, *f* et *Doc*). Les résultats de (*MRR*) sont calculés selon l'équation :

$$MRR = Vc * f * Doc \ \ (cm^3/min) \quad \textbf{(V.4)}$$

***Tableau V. 1** Résultats des expériences de (Ra, Fz, Pc et MRR).*

Vc (m/min)	*f (mm/tr)*	*Doc* (mm)	*Fz* (N)	*Ra (µm)*	*MRR (cm^3/min)*	*Pc (W)*
273	0.08	0.3	45.77	1.35	6.55	208.25
		0.6	55.87	1.32	13.10	254.21
		0.9	90.38	1.28	19.66	411.23
	0.14	0.3	48.87	2.64	11.47	222.36
		0.6	69.35	2.38	22.93	315.54
		0.9	133.93	2.37	34.40	609.38
	0.20	0.3	68.01	3.03	16.38	309.45
		0.6	134.71	2.68	32.76	612.93
		0.9	172.32	2.79	49.14	784.06
382	0.08	0.3	34.43	1.04	9.17	219.20
		0.6	49.12	1.06	18.34	312.73
		0.9	81.24	1.06	27.50	517.23
	0.14	0.3	47.22	1.57	16.04	300.63
		0.6	57.6	1.57	32.09	366.72
		0.9	128.11	1.61	48.13	815.63
	0.20	0.3	57.61	2.10	22.92	366.78
		0.6	125.92	2.15	45.84	801.69
		0.9	162.72	2.17	68.76	1035.98
546	0.08	0.3	29.47	0.70	13.10	268.18
		0.6	42.80	0.81	26.21	389.48
		0.9	77	0.79	39.31	700.70
	0.14	0.3	44.09	1.16	22.93	401.22
		0.6	51.43	1.20	45.86	468.01
		0.9	125.7	1.38	68.80	1143.87
	0.20	0.3	52.95	2.05	32.76	481.85
		0.6	115.51	2.04	65.52	1051.14
		0.9	157.64	2.05	98.28	1434.52

Le **tableau V.2** expose les résultats pour le calcul de rapport (S/N). L’équation (**V.2**) est appliquée pour maximiser le (*MRR*) et l’équation (**V.3**) pour minimiser les paramètres de sortie (*Fz*, *Ra* et *Pc*).

***Tableau V. 2** Résultats du rapport (S/N) pour (Fz, Ra, Pc et MRR)*

N° d'essai	*Fz*	*Ra*	*Pc*	*MRR*
	S/N (dB)	S/N (dB)	S/N (dB)	S/N (dB)
1	-33.2116	-2.607	-46.372	16.327
2	-34.9436	-2.411	-48.104	22.348
3	-39.1214	-2.144	-52.282	25.870
4	-33.7808	-8.432	-46.941	21.188
5	-36.8209	-7.532	-49.981	27.209
6	-42.5376	-7.495	-55.698	30.731
7	-36.6515	-9.629	-49.812	24.286
8	-42.588	-8.563	-55.748	30.307
9	-44.7267	-8.912	-57.887	33.829
10	-30.7387	-0.341	-46.817	19.245
11	-33.8252	-0.506	-49.903	25.266
12	-38.1954	-0.506	-54.274	28.788
13	-33.4825	-3.918	-49.561	24.106
14	-35.2084	-3.918	-51.287	30.127
15	-42.1517	-4.137	-58.230	33.649
16	-35.21	-6.444	-51.288	27.204
17	-42.0019	-6.649	-58.080	33.225
18	-44.2288	-6.729	-60.307	36.747
19	-29.3876	3.098	-48.569	22.348
20	-32.6289	1.830	-51.810	28.369
21	-37.7298	2.047	-56.911	31.891
22	-32.8868	-1.289	-52.068	27.209
23	-34.2243	-1.584	-53.405	33.229
24	-41.9867	-2.798	-61.168	36.751
25	-34.4773	-6.235	-53.658	30.307
26	-41.2524	-6.193	-60.433	36.327
27	-43.9533	-6.235	-63.134	39.849

Les **figures V.1** (a, b, c et d) illustrent les graphes des effets principaux du rapport (S/N) pour chaque paramètre de sortie (*Fz*), (*Ra*), (*Pc*) et (*MRR*) respectivement. On constate d'après ces figures que le régime mono-objective optimal pour le paramètre (*Fz*) est : Vc_3, f_1, Doc_1, ce qui correspond à une vitesse de coupe *Vc*=546 m/min, la plus faible avance *f*=0.08 mm/tr et une profondeur de passe *Doc*=0.3 mm. Pour la rugosité de surface (*Ra*), le régime optimal obtenu par la méthode de Taguchi est Vc_3, f_1, Doc_2, ce qui correspond à une vitesse de coupe *Vc*=546 m/min, la plus faible avance *f*=0.08 mm/tr et une profondeur de passe *Doc*=0.6 mm. Concernant la puissance de coupe (*Pc*), le régime optimal est donné par la combinaison (Vc_1, f_1, Doc_1), qui correspond à *Vc*=273 m/min, une avance *f*=0.08 mm/tr et une profondeur de passe *Doc*=0.3 mm. Enfin, le régime optimal pour le débit du coupeau enlevé (*MRR*) est donné par la

combinaison suivante (*Vc*3, *f*3, *Doc*3), qui correspond aux valeurs les plus élevées des paramètres de coupe (*Vc*= 546 m/min, *f*=0.2 mm/tr, et *Doc*=0.9 mm). Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence par des carrés en bleu (**Figure V.1**).

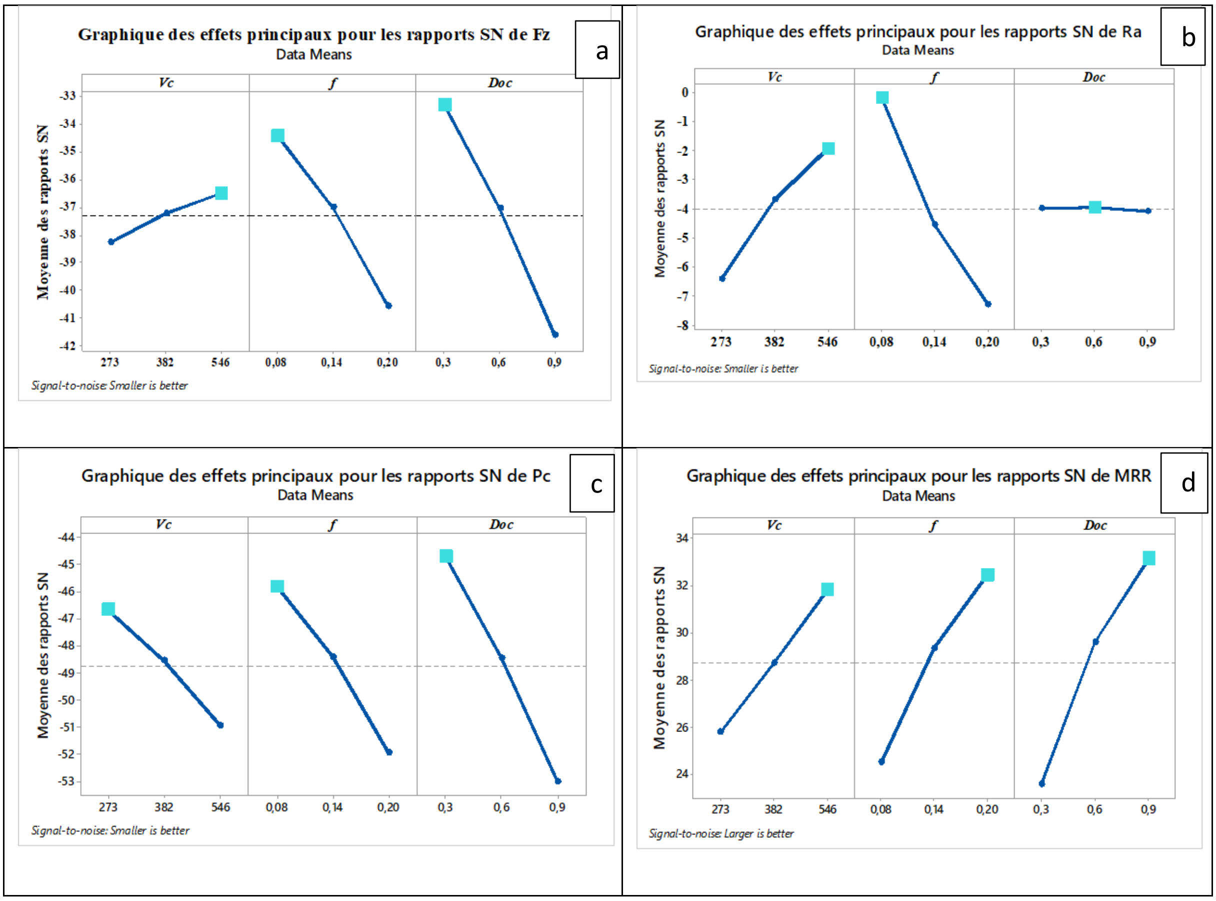


Figure V. 1 (a, b, c et d) *Graphiques des effets principaux de* (*S/N*) *pour* (*Fz, Ra, Pc et MRR*).

Le tableau V.3 résume les régimes optimaux pour chaque paramètre (*Fz*, *Ra*, *Pc* et *MRR*), obtenues par la méthode mono-objectif de Taguchi.

Tableau V. 3 *Régimes optimaux pour (Fz, Ra, Pc et MRR) obtenues par la méthode de Taguchi*

	Vc (m/min)	***f (mm/min)***	***Doc (mm)***
Minimisation de Fz	*546*	*0.08*	*0.3*
Minimisation de Ra	*546*	*0.08*	*0.6*

Minimisation de Pc	*273*	*0.08*	*0.3*
Maximisation de MRR	*546*	*0.2*	*0.9*

D'après le tableau V. 3, on remarque une diversité des régimes de coupe pour chaque cas, par exemple, si on veut une productivité maximale ; il faut utiliser des conditions de coupe élever, par contre la minimisation de la puissance de coupe exige l'utilisation d'un régime avec des valeurs basses. La principale faiblesse de cette optimisation suivant l'analyse de Taguchi basée sur le rapport (S/N) est que cette dernière est réservée seulement à l'optimisation d'un seul paramètre de sortie. Afin de trouver un compromis entre les paramètres de sortie ensemble une optimisation multi-objective avec différentes méthodes.

V.3 Méthodes d'optimisation Multi-Objective

V.3.1 L'approche de la fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du champ expérimental, un ajustement des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Afin d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre de la méthodologie de la surface de réponse a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est requis par cette planification afin d'explorer la région de la surface de réponse proche de l'optimum. L'optimisation de la réponse (*MSR*) permet d'identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrée qui optimise une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire les conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation des réponses multiples est une méthode favorisant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes à travers la fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur zéro, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, tandis qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas optimal **[106]**.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (*Ra*), le débit du coupeau enlevé (*MRR*) et l'effort tangentiel (*Fz*) avec la puissance de coupe (*Pc*) de coupe souhaités avec les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (*Ra*), minimiser l'effort tangentiel (*Fz*) avec la puissance de coupe (*Pc*) et aussi maximiser le débit du coupeau enlevé (*MRR*) en semble.

Pour obtenir des solutions de ce type aux problèmes de planification des paramètres, une fonction objectif F(x), est définie comme suit **[107]** :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i^{wi}\right) \qquad \textbf{(V.5)}$$

$$F(x) = -DF$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i. Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i, la désirabilité d_i est :

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Yi - Inf_i}{T_i - Inf_i}\right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i$$

$$di = \left[\frac{Yi - Sup_i}{T_i - Sup_i}\right] \text{ Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \qquad \textbf{(V.6)}$$

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est donnée comme suit :

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[\frac{Yi - Inf_i}{Sup_i - Inf_i}\right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \qquad \textbf{(V.7)}$$

$$di = 1 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définie par les formules suivantes :

$$di = 1 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \qquad \textbf{(V.8)}$$

$di = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i}\right]$ Si $Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i$

$di = 0$ Si $Y_i \geq Sup_i$

Dans la présente étude on cherche à optimiser simultanément l'effort de coupe (*Fz*), le critère de rugosité (*Ra*), le débit du coupeau enlevé (*MRR*) et la puissance de coupe (*Pc*) avec une approche d'optimisation de DF. En effet, le but est de trouver les conditions de coupes optimales lors du tournage de la fonte grises EN-GJL-250 avec une plaquette de coupe CBN7050. Différents cas d'optimisation ont été considérés, à savoir :

*1er **cas :** concerne la maximisation du débit de copeaux, ce qui est souhaité pour les opérations d'ébauchage où l'objectif est d'obtenir une production maximale, donc on attribue une importance maximale (*****) au (*MRR*) tout en donnant à la rugosité de la surface un faible intérêt (*).

***2eme cas :** Pour une opération de finition de la surface des pièces usinées, la minimisation de la rugosité de surface devient l'objectif principal, auquel on attribue une importance maximale (*****) tout en maintenant le (*MRR*) à son niveau bas (*).

***3eme cas :** Dans le but de rechercher un compromis entre les deux paramètres (minimisation de (*Ra*) et maximisation de (*MRR*)) en même temps, on donne le même degré d'importance (*****) pour les deux paramètres considérés.

***4eme cas :** consiste à minimiser à la fois l'effort de coupe (*Fz*) et la puissance de coupe (*Pc*) pour la minimisation de la consommation d'énergie. Dans ce cas, on donne une importance maximale de (*****) pour (*Fz*) et (*Pc*).

***5eme cas :** consiste à minimiser à la fois la rugosité de surface (*Ra*) et la puissance de coupe (*Pc*) maximisation de (*MRR*). Dans ce cas, on donne une importance maximale de (*****) pour les trois paramètres. Le **tableau V.4**, résume les cinq cas d'optimisations précédentes réalisés dans cette étude avec les contraintes souhaitées.

Tableau V. 4 *Contraintes pour les cinq cas d'optimisations.*

Nom	But	Limite inf.	Limite Sup.	Poids inf.	Poids sup.	Importance
***Vc* (m/min)**	dans l'intervalle	273	546	1	1	3
f (mm/rev)	dans l'intervalle	0,08	0,2	1	1	3
***Doc* (mm)**	dans l'intervalle	0,3	0,9	1	1	3
1er cas						
***Ra* (µm)**	minimiser	0,7	3,03	1	1	1
***MRR* (cm^3/min)**	maximiser	6,552	98,28	1	1	5

2eme cas						
Ra **(µm)**	minimiser	0,7	3,03	1	1	5
MRR **(cm^3/min)**	maximiser	6,552	98,28	1	1	1
3eme cas						
Ra **(µm)**	minimiser	0,7	3,03	1	1	5
MRR **(cm^3/min)**	maximiser	6,552	98,28	1	1	5
4eme **cas**						
Fz **(N)**	minimiser	29,47	172,32	1	1	5
Pc **(W)**	minimiser	208,25	1434,52	1	1	5
5eme **cas**						
Ra **(N)**	minimiser	29,47	172,32	1	1	5
Pc **(W)**	minimiser	208,25	1434,52	1	1	5
MRR **(cm^3/min)**	maximiser	6,552	98,28	1	1	5

Dans notre cas, le logiciel Design Expert 10 a été utilisé afin de trouver les régimes optimaux. Les résultats trouvés sont présentés dans les **tableaux V.5, V.6** et **V7.**

Tableau V. 5 *Solutions d'optimisation du 1er, 2eme et 3eme cas.*

Cas d'optimisation	*Vc (m/min)*	*f (mm/tr)*	*Doc(mm)*	*Ra* (µm)	*MRR* (cm^3/min)	Désirabilité
1er cas	546	0.200	0.90	1.928	**98.28**	0.883
2eme cas	522	0.080	0.90	**0.815**	37.59	0.800
3eme cas	546	0.196	0.90	**1.902**	**96.22**	0.688

Le tableau V.5 rassemble les résultats des trois cas d'optimisation qui concerne la minimisation (*Ra*), la maximisation (*MRR*) et l'optimisation combinée de (*Ra*) et (*MRR*) avec le même degré d'importance. On voit que les résultats optimaux du 1er cas et du 3eme cas sont très proches, avec une légère augmentation des valeurs de (*Ra*) et (*MRR*) pour le premier cas. Aussi, il faut noter que, quelle que soit l'importance accordée à (*Ra*), le (*MRR*) varie seulement de 2.09 % entre le 1er cas et le 3eme. Dans le 2er cas d'optimisation les valeurs de (*Ra*) et (*MRR*) sont presque à leurs bas niveaux. Les **figures V. 2 a, b et c,** illustrent les graphiques des bars de désirabilité pour les trois cas d'optimisation.

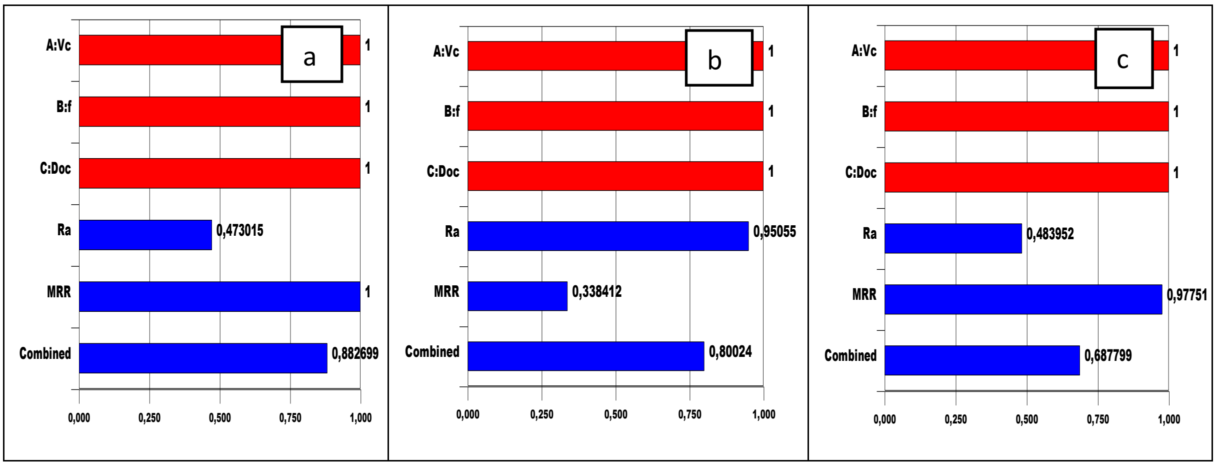


Figure V. 2 Graphiques de bar de désirabilité pour les trois cas d'optimisation : **a)** 1er cas **b)** 2eme cas **c)** 3eme cas

Les résultats correspondant à la minimisation de la consommation d'énergie (Tableau V.6) montrent que cet objectif est atteint grâce à une réduction de l'avance par tour et de la profondeur de passe, c'est à-dire de la section de la tranche cisaillée, alors que la vitesse de coupe sera à sa valeur maximale, ce qui permet une réduction de l'effort de coupe.

***Tableau V. 6** Solutions d'optimisation du 4eme cas.*

Cas d'optimisation	*Vc* (m/min)	*f* (mm/tr)	*Doc* (mm)	*Fz* (N)	*Pc* (W)	Désirabilité
4eme cas	546	0,080	0,30	29	214,432	0,997

Les résultats du 5ème cas d'optimisation concernent la minimisation de la rugosité de surface (*Ra*) et la puissance de coupe (*Pc*) avec la maximisation du débit du coupeau enlevé (*MRR*) simultanément. L'analyse des résultats du (Tableau V. 7**)** montre que cet objectif combiner est atteint grâce au régime de coupe suivant : *Vc* = 546 m/min, *f* = 0.11 mm/tr et *Doc* = 0.7 mm, ce qui correspondant aux valeurs de *Ra* = 1.089 µm, *Pc* = 633.8 W et *MRR* = 42.326 cm^3/min.

***Tableau V. 7** Solution d'optimisation du 5eme cas.*

Cas d'optimisation	*Vc* (m/min)	*f* (mm/tr)	*Doc* (mm)	*Ra* *(µm)*	*MRR* *(cm^3/min)*	*Pc (W)*	Désirabilité
5eme cas	545,998	0,107	0,724	1,089	42,326	633,811	0,596

La **figure V.3** présente les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (*Vc*, *f* et *Doc*), de même celles des paramètres technologiques (*Ra*, *Pc* et *MRR*). D'après la figure V.3 les solutions de la rugosité de surface (*Ra*) et la puissance de coupe (*Pc*) ont presque atteint l'objectif. D'autre part, le débit du coupeau enlevé (*MRR*) prend presque une valeur moyenne dans l'intervalle entre 6.55 cm^3/min et 98.28 cm^3/min.

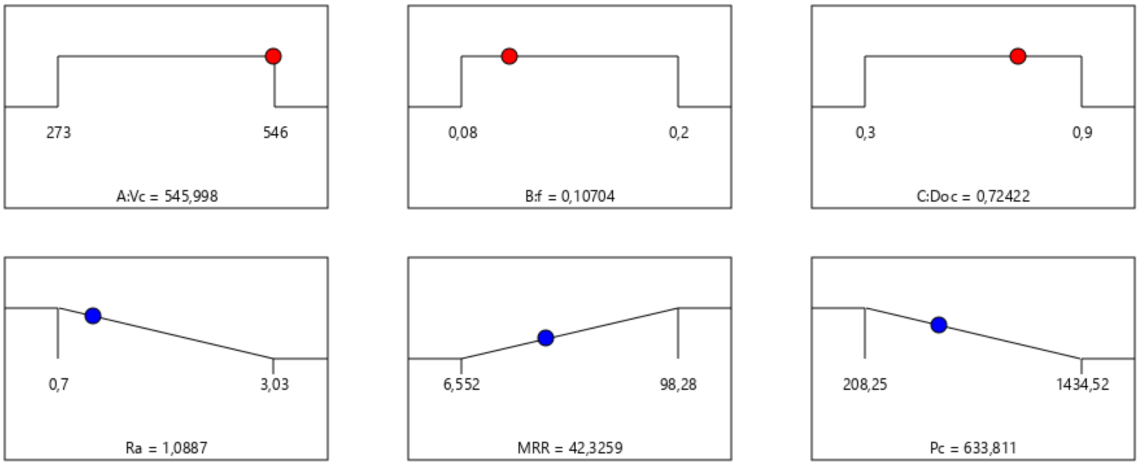


Figure V. 3 *Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra, Pc et MRR).*

V.3.2 Méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle grise (GRA) est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage. L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes:

- **Étape 1: Génération relationnelle grise**

Selon l'objective de l'optimisation prévue pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport *S/N* pour les résultats expérimentaux dans l'intervalle entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise **[108]**. En fonction de la fonction objective de l'optimisation, la normalisation peut être effectuée pour deux cas. Si la plus petite-la-meilleure est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la minimisation, elle devrait être normalisée par l'équation ***(V.9)*** **[109]**.

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \tag{V.9}$$

Si le plus grand-le-meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence d'origine pour la maximisation, elle devrait être normalisée par l'équation ***(V.10)***.

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad \textbf{(V.10)}$$

Ou x_i^* (k) est la valeur après la génération relationnelle grise (valeur normalisée), et max (xi0 (k)) et min (xi0 (k)) sont les valeurs les plus grandes et les plus petites de (xi0 (k)) pour la réponse k^{th}. La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les meilleurs résultats normalisés seront égaux à un.

- **Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC)**

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris (ξ_i(k)) est donnée comme suit :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad \textbf{(V.11)}$$

$$0 < \xi_i(k) \leq 1$$

$\Delta_{0i}(k)$ Est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/N de la séquence mesurée $x_i^k(k)$.

$$\Delta_{0i}(k) = \left\| x_0(k) - x_i(k) \right\| \quad \textbf{(V.12)}$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \left\| x_0(k) - x_i(k) \right\| \quad \textbf{(V.13)}$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \left\| x_0(k) - x_i(k) \right\| \quad \textbf{(V.14)}$$

ψ est le coefficient de distinction ($\psi \in [0, 1]$). Dans notre cas la valeur de ψ *est* 0.5.

- **Étape 3: Grey Relationnel Grade (GRG)**

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \xi_i(k) \quad \textbf{(V.15)}$$

Ou n est le nombre des réponses.

Étape 4: Détermination des paramètres d'usinage optimum

Une fois que GRG est calculée, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite en fonction du diagramme d'effets principaux pour (GRG). La plus grande valeur de GRG qui se trouve à proximité de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec la plus grande valeur GRG.

Une fois que le grade relationnel gris (GRG) est calculé (Tableau V.8), la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite sur la base de la valeur GRG la plus élevée qui est proche de la valeur normalisée idéale correspondant à la combinaison optimale. On peut conclure que la meilleure combinaison de paramètres d'usinage avec la valeur GRG la plus élevée (0.731) a été trouvée comme suit (Vc_3, f_1, Doc_1) : c'est-à-dire *Vc*=546 m/min, *f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.3 mm (tableau V.8). Les résultats des paramètres de sortie concernant l'utilisation de cette combinaison de niveaux optimaux sont : *Ra* = 0.7 µm, *MRR* = 13.104 cm^3/min et *Pc* = 268.18 W.

Tableau V. 8 *Résultats de la normalisation, coefficient relationnel gris (CRG) et grade relationnel gris (GRG).*

N° of Test	*S/N calculate*			*Normalisation of S/N*			*Grey Relation Coefficients of S/N*			*Grey Relation Grade*	
	SN-MRR	SN-Ra	SN-Pc	SN-MRR	SN-Ra	SN-Pc	SN-MRR	SN-Ra	SN-Pc	GRG	Rank
1	16.327	-2.607	-46.372	0.000	0.552	1.000	0.333	0.527	1.000	0.620	5
2	22.348	-2.411	-48.104	0.256	0.567	0.897	0.402	0.536	0.829	0.589	7
3	25.870	-2.144	-52.282	0.406	0.588	0.647	0.457	0.548	0.586	0.531	16
4	21.188	-8.432	-46.941	0.207	0.094	0.966	0.387	0.356	0.936	0.560	10
5	27.209	-7.532	-49.981	0.463	0.165	0.785	0.482	0.374	0.699	0.518	18
6	30.731	-7.495	-55.698	0.612	0.168	0.444	0.563	0.375	0.473	0.471	26
7	24.286	-9.629	-49.812	0.338	0.000	0.795	0.430	0.333	0.709	0.491	23
8	30.307	-8.563	-55.748	0.594	0.084	0.441	0.552	0.353	0.472	0.459	27
9	33.829	-8.912	-57.887	0.744	0.056	0.313	0.661	0.346	0.421	0.476	25
10	19.245	-0.341	-46.817	0.124	0.730	0.973	0.363	0.649	0.950	0.654	2
11	25.266	-0.506	-49.903	0.380	0.717	0.789	0.446	0.638	0.704	0.596	6
12	28.788	-0.506	-54.274	0.530	0.717	0.529	0.515	0.638	0.515	0.556	13
13	24.106	-3.918	-49.561	0.331	0.449	0.810	0.428	0.476	0.724	0.543	15
14	30.127	-3.918	-51.287	0.587	0.449	0.707	0.547	0.476	0.630	0.551	14
15	33.649	-4.137	-58.230	0.736	0.432	0.293	0.655	0.468	0.414	0.512	20
16	27.204	-6.444	-51.288	0.462	0.250	0.707	0.482	0.400	0.630	0.504	21
17	33.225	-6.649	-58.080	0.718	0.234	0.302	0.640	0.395	0.417	0.484	24
18	36.747	-6.729	-60.307	0.868	0.228	0.169	0.791	0.393	0.376	0.520	17
19	22.348	3.098	-48.569	0.256	1.000	0.869	0.402	1.000	0.792	0.731	1
20	28.369	1.830	-51.810	0.512	0.900	0.676	0.506	0.834	0.606	0.649	3
21	31.891	2.047	-56.911	0.662	0.917	0.371	0.596	0.858	0.443	0.633	4
22	27.209	-1.289	-52.068	0.463	0.655	0.660	0.482	0.592	0.595	0.556	12
23	33.229	-1.584	-53.405	0.719	0.632	0.580	0.640	0.576	0.544	0.587	8
24	36.751	-2.798	-61.168	0.868	0.537	0.117	0.792	0.519	0.362	0.557	11
25	30.307	-6.235	-53.658	0.594	0.267	0.565	0.552	0.405	0.535	0.497	22

26	36.327	-6.193	-60.433	0.850	0.270	0.161	0.770	0.407	0.373	0.517	19
27	39.849	-6.235	-63.134	1.000	0.267	0.000	1.000	0.405	0.333	0.580	9

V.3.3 Méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (*DEAR*)

Dans cette méthode, une combinaison de réponses originales est transformée en un rapport, de sorte que les niveaux les plus appropriés peuvent être calculés sur la base de ce rapport. La valeur peut être considérée comme un indice de performance multi réponses (MRPI) pour calculer les combinaisons optimales des paramètres d'entrée. Les étapes suivantes sont impliquées dans la méthodologie de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données **[110-111]**.

- **Étape 1 :** Déterminez les poids (w) pour chaque réponse pour toutes les expériences. Le poids de la réponse est le rapport entre la réponse à tout essai et la somme de toutes les réponses.

$$W_{MRR_i} = {MRR_i}\Big/{\sum_{i=1}^{n} MRR_i} \qquad \textbf{(V.16)}$$

$$W_{Ra_i} = {{}^{1}\!/_{Ra_i}}\Big/{\sum_{i=1}^{n} {}^{1}\!/_{Ra_i}} \qquad \textbf{(V.17)}$$

$$W_{Pc_i} = {{}^{1}\!/_{Pci}}\Big/{\sum_{i=1}^{n} {}^{1}\!/_{Pc_i}} \qquad \textbf{(V.18)}$$

- **Étape 2 :** Transformez les données de réponse en données pondérées en multipliant les valeurs expérimentales avec son propre poids.

$$MRR^* = MRR \times W_{MRR} \qquad \textbf{(V.19)}$$

$$Ra^* = Ra \times W_{Ra} \qquad \textbf{(V.20)}$$

$$Pc^* = Pc \times W_{Pc} \qquad \textbf{(V.21)}$$

- **Étape 3:** Divisez les données comme suit : plus c'est grand, mieux c'est, et plus c'est petit, mieux c'est.
- **Étape 4:** Traitez cette valeur (MRPI) comme un indice de performance multi réponses.

$$MRPI = \frac{MRR^*}{Ra^* + Pc^*} \qquad \textbf{(V.22)}$$

MRPI est le rapport entre la somme des données des paramètres de maximisation et la somme des données des paramètres de minimisation. Dans la présente étude, le paramètre à maximiser

est le débit du coupeau enlevé (*MRR*), par contre la rugosité de surface (*Ra*) et la puissance de coupe (Pc) sont les paramètres à minimiser.

La valeur de MRPI de chaque essai avec différentes combinaisons des paramètres a été calculée en utilisant l'approche Taguchi - DEAR. Une fois que l'indice de performance multi réponses (MRPI) est calculé (Tableau V.9), la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite sur la base de la valeur MRPI la plus élevée qui est proche de la valeur normalisée idéale correspondant à la combinaison optimale. On peut conclure que la meilleure combinaison de paramètres d'usinage a été trouvée comme suit (Vc_3, f_2, Doc_2) : c'est-à-dire Vc=546 m/min, f=0.14 mm/tr et Doc=0.6 mm (Tableau V.9). Les résultats de l'utilisation de cette combinaison de niveaux optimaux sont : Ra = 1.2 µm, MRR = 45.86 cm^3/min et Pc = 468.01 W.

Tableau V. 9 *Résultats de la méthode DEAR.*

N° d'essai	W_{Ra}	W_{Pc}	W_{MRR}	Ra*	Pc*	MRR*	MRPI	Rank
1	0,024	0,032	0,021	-0,063	-1,489	0,343	-1,209	19
2	0,022	0,033	0,029	-0,054	-1,603	0,643	-1,014	9
3	0,020	0,036	0,033	-0,042	-1,893	0,862	-1,074	12
4	0,078	0,033	0,027	-0,657	-1,526	0,578	-1,605	25
5	0,070	0,035	0,035	-0,524	-1,730	0,953	-1,301	21
6	0,069	0,039	0,040	-0,519	-2,149	1,216	-1,452	23
7	0,089	0,035	0,031	-0,857	-1,719	0,759	-1,816	27
8	0,079	0,039	0,039	-0,677	-2,153	1,183	-1,648	26
9	0,082	0,040	0,044	-0,734	-2,321	1,473	-1,582	24
10	0,003	0,032	0,025	-0,001	-1,518	0,477	-1,042	10
11	0,005	0,035	0,033	-0,002	-1,725	0,822	-0,905	4
12	0,005	0,038	0,037	-0,002	-2,040	1,067	-0,976	8
13	0,036	0,034	0,031	-0,142	-1,701	0,748	-1,095	15
14	0,036	0,036	0,039	-0,142	-1,822	1,169	-0,795	2
15	0,038	0,040	0,043	-0,158	-2,349	1,458	-1,049	11
16	0,060	0,036	0,035	-0,384	-1,822	0,953	-1,253	20
17	0,061	0,040	0,043	-0,408	-2,337	1,421	-1,324	22
18	0,062	0,042	0,047	-0,418	-2,519	1,738	-1,199	18
19	-0,029	0,034	0,029	-0,089	-1,634	0,643	-1,080	14
20	-0,017	0,036	0,037	-0,031	-1,859	1,036	-0,854	3
21	-0,019	0,039	0,041	-0,039	-2,243	1,309	-0,973	7
22	0,012	0,036	0,035	-0,015	-1,878	0,953	-0,940	6
23	0,015	0,037	0,043	-0,023	-1,976	1,422	-0,577	1

24	0,026	0,042	0,047	-0,072	-2,592	1,739	-0,925	5
25	0,058	0,037	0,039	-0,359	-1,994	1,183	-1,171	16
26	0,057	0,042	0,047	-0,354	-2,530	1,699	-1,185	17
27	0,058	0,044	0,051	-0,359	-2,761	2,044	-1,076	13

V.3.4 Technique de l'ordre de préférence par similitude avec la solution idéale (*TOPSIS*)

La technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale (*TOPSIS*) est une approche basée sur la méthode de prise de décision multicritères pour évaluer la meilleure solution de rechange. TOPSIS repose sur l'idée que l'alternative sélectionnée doit être la plus proche de la meilleure solution (également appelée idéal positif) et la plus éloignée de la pire solution (idéal négatif). Les étapes suivies dans cette approche sont les suivantes **[112-113]**.

- **Étape 1 :** former une matrice de décision (comme indiqué dans l'équation 1) qui couvre les informations de tous les attributs (caractéristiques de sortie) et les alternatives du processus,

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \textbf{(V. 23)}$$

Les alternatives prometteuses sont indiquées en ligne (i = 1, 2, ..., m) et toutes les qualités associées à chacune des alternatives sont indiquées en colonne (j = 1, 2, ..., n).

- **Étape 2 :** Dans l'étape suivante, la matrice de décision est normalisée à l'aide de l'équation suivante :

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad \textbf{(V. 24)}$$

Où, x'_{ij} représente la valeur normalisée. La matrice de décision normalisée peut être caractérisée comme suit

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & \cdots & x'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{m1} & \cdots & x'_{mn} \end{bmatrix} \quad \textbf{(V. 25)}$$

- **Étape 3 :** La matrice de décision normalisée pondérée est ensuite calculée en assumant le poids de chaque réponse de qualité (attribut) et en multipliant par la valeur normalisée correspondante.

$$Y = w_j x'_{ij} \quad \textbf{(V. 26)}$$

La matrice de décision normalisée pondérée est présentée ci-dessous :

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix} \quad \textbf{(V. 26)}$$

- **Étape 4 :** Calculez la meilleure (idéal positif) et la pire (idéal négatif) solution en utilisant les équations suivantes :

(a) Meilleure solution (idéale positive)

$$A^B = \{(\max y_{ij} | j \in J|); (\min y_{ij} | j \in J|)\} = \{y_1^B, y_1^B, \dots \dots .. y_j^B, \dots \dots .., y_n^B\} \quad \textbf{(V. 27)}$$

(b) La mauvaise solution (idéal négatif)

$$A^W = \{(\min y_{ij} | j \in J|); (\max y_{ij} | j \in J|)\} = \{y_1^W, y_1^W, \dots \dots .. y_j^W, \dots \dots .., y_n^W\} \quad \textbf{(V. 28)}$$

Où, J est l'ensemble des caractéristiques de qualité positive et J'est l'ensemble des caractéristiques de qualité négative.

- **Étape 5 :** Ensuite, calculer la mesure de séparation pour chaque alternative en utilisant les équations (8) et (9).

(a) Séparation de la meilleure solution (idéal positif)

$$S_i^B = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_{ij} - y_j^B)^2} \; ; i = 1,2, \dots \dots \dots , m \quad \textbf{(V. 29)}$$

(b) Séparation de la pire solution (idéal négatif)

$$S_i^W = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_{ij} - y_j^W)^2} \; ; i = 1,2, \dots \dots \dots , m \quad \textbf{(V. 30)}$$

- **Étape 6 :** Enfin, calculez la proximité relative de la solution idéale à l'aide de la formule donnée ci-dessous.

$$C_i^+ = \frac{S_i^W}{S_i^B + S_i^W} \; ; i = 1,2, \dots \dots \dots , m; 0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad \textbf{(V. 31)}$$

- **Étape 7 :** Attribuez un rang à toutes les valeurs de proximité relative après les avoir classées par ordre décroissant. La valeur la plus élevée de la proximité relative indique une bonne mesure de la qualité.

La valeur de C_i^+ de chaque essai avec différentes combinaisons des paramètres a été calculée en utilisant l'approche Taguchi - *TOPSIS*. Une fois que la proximité relative de la solution idéale est calculé (Tableau V.10), la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite sur la base de la valeur C_i^+ la plus élevée qui est proche de la valeur normalisée idéale

correspondant à la combinaison optimale. On peut conclure que la meilleure combinaison de paramètres d'usinage a été trouvée comme suit (Vc_3, f_1, Doc_3) : c'est-à-dire *Vc*=546 m/min, *f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.9 mm (Tableau V.10). Les résultats de l'utilisation de cette combinaison de niveaux optimaux sont : *Ra* = 0.79 µm, *MRR* = 39.31 cm^3/min et *Pc* = 700.7 W.

Tableau V. 10 *Résultats de la méthode TOPSIS.*

N° d'essai	*Ra'*	*Pc'*	*MRR'*	Y_{Ra}	Y_{Pc}	Y_{MRR}	Si+	Si-	Ci+	Rang
1	-0,094	-0,166	0,107	-0,031	-0,055	0,036	0,086	0,087	0,503	12
2	-0,087	-0,172	0,147	-0,029	-0,057	0,049	0,076	0,089	0,539	11
3	-0,077	-0,187	0,170	-0,026	-0,062	0,057	0,070	0,093	0,570	9
4	-0,304	-0,168	0,139	-0,101	-0,056	0,046	0,144	0,026	0,154	26
5	-0,271	-0,179	0,179	-0,090	-0,060	0,060	0,131	0,038	0,226	23
6	-0,270	-0,200	0,202	-0,090	-0,067	0,067	0,129	0,042	0,243	22
7	-0,347	-0,179	0,159	-0,116	-0,060	0,053	0,157	0,024	0,131	27
8	-0,308	-0,200	0,199	-0,103	-0,067	0,066	0,142	0,034	0,195	25
9	-0,321	-0,208	0,222	-0,107	-0,069	0,074	0,145	0,040	0,215	24
10	-0,012	-0,168	0,126	-0,004	-0,056	0,042	0,061	0,113	0,650	6
11	-0,018	-0,179	0,166	-0,006	-0,060	0,055	0,054	0,112	0,676	5
12	-0,018	-0,195	0,189	-0,006	-0,065	0,063	0,050	0,113	0,692	4
13	-0,141	-0,178	0,158	-0,047	-0,059	0,053	0,091	0,072	0,443	15
14	-0,141	-0,184	0,198	-0,047	-0,061	0,066	0,087	0,076	0,467	13
15	-0,149	-0,209	0,221	-0,050	-0,070	0,074	0,089	0,076	0,461	14
16	-0,232	-0,184	0,179	-0,077	-0,061	0,060	0,118	0,047	0,286	21
17	-0,239	-0,208	0,218	-0,080	-0,069	0,073	0,119	0,052	0,304	20
18	-0,242	-0,216	0,241	-0,081	-0,072	0,080	0,119	0,057	0,322	18
19	0,112	-0,174	0,147	0,037	-0,058	0,049	0,038	0,154	0,801	3
20	0,066	-0,186	0,186	0,022	-0,062	0,062	0,030	0,141	0,824	2
21	0,074	-0,204	0,209	0,025	-0,068	0,070	0,025	0,144	0,853	1
22	-0,046	-0,187	0,179	-0,015	-0,062	0,060	0,060	0,104	0,634	8
23	-0,057	-0,191	0,218	-0,019	-0,064	0,073	0,059	0,104	0,640	7
24	-0,101	-0,219	0,241	-0,034	-0,073	0,080	0,073	0,093	0,560	10
25	-0,224	-0,192	0,199	-0,075	-0,064	0,066	0,114	0,052	0,313	19
26	-0,223	-0,217	0,238	-0,074	-0,072	0,079	0,113	0,060	0,348	17
27	-0,224	-0,226	0,262	-0,075	-0,075	0,087	0,114	0,066	0,366	16

V.3.5 Algorithme génétique de tri non dominé -II (NSGA-II)

Algorithme génétique de tri non dominé II (NSGA-II) est parmi les méthodes utilisé pour optimiser les paramètres d'usinage. Elle est développée par Dep Kalyanmoy **[114]**. Cet algorithme est basé sur le concept de dominance de Pareto. Tout d'abord, une population de 100 individus est initialisée. Ces personnes sont classées par ordre croissant sur différents fronts en fonction de la non-domination. En outre, la distance de l'encombrement (crowding) de chaque individu est calculée. Ce paramètre est utilisé pour augmenter la diversité de la population, de sorte que les solutions à forte distance de l'encombrement sont considérées comme de meilleures solutions. Ensuite, selon le rang individuel et la distance de l'encombrement, la sélection est effectuée en utilisant des tournois binaires. NSGA-II utilise un opérateur de croisement binaire simulé, qui combine deux parents pour créer deux enfants. La distance entre les enfants et les parents est déterminée par l'indice de distribution de croisement η_c, qui est égal à 20. La mutation polynomiale est utilisée pour changer le parent en un enfant avec un indice de distribution des mutations (η_m) de 20. Le problème est résolu par une probabilité de croisement (P_{cr}) de 0,9 et une probabilité de mutation (P_m) de 0,25. Le critère d'arrêt de l'algorithme est un nombre maximum de générations de 100. Le problème est résolu en utilisant le logiciel MATLAB R2014a. La figure 7 montre l'organigramme de l'algorithme NSGA-II. Généralement, les principales étapes de la NSGA-II sont données comme suit **[115]**.

- **Étape 1 :** Initialisez aléatoirement la population parente en fonction de la plage de problèmes et de la contrainte.
- **Étape 2 :** Classer la population à l'aide de critères de non-domination. Les individus de la population sont sélectionnés en fonction du rang et de la distance de l'encombrement.
- **Étape 3 :** Appliquer les opérateurs génétiques de sélection, de croisement et de mutation pour générer la population de descendants et valider la population de descendants.
- **Étape 4 :** La population de descendants et la population de la génération actuelle sont combinées et les individus de la prochaine génération sont déterminés par sélection.
- **Étape 5 :** Le principe de fin est que la génération évolutive actuelle dépasse la génération évolutive maximale. Consigner l'ensemble optimal de Pareto du candidat s'il respecte le principe de résiliation. Sinon, retourner à l'étape 2.

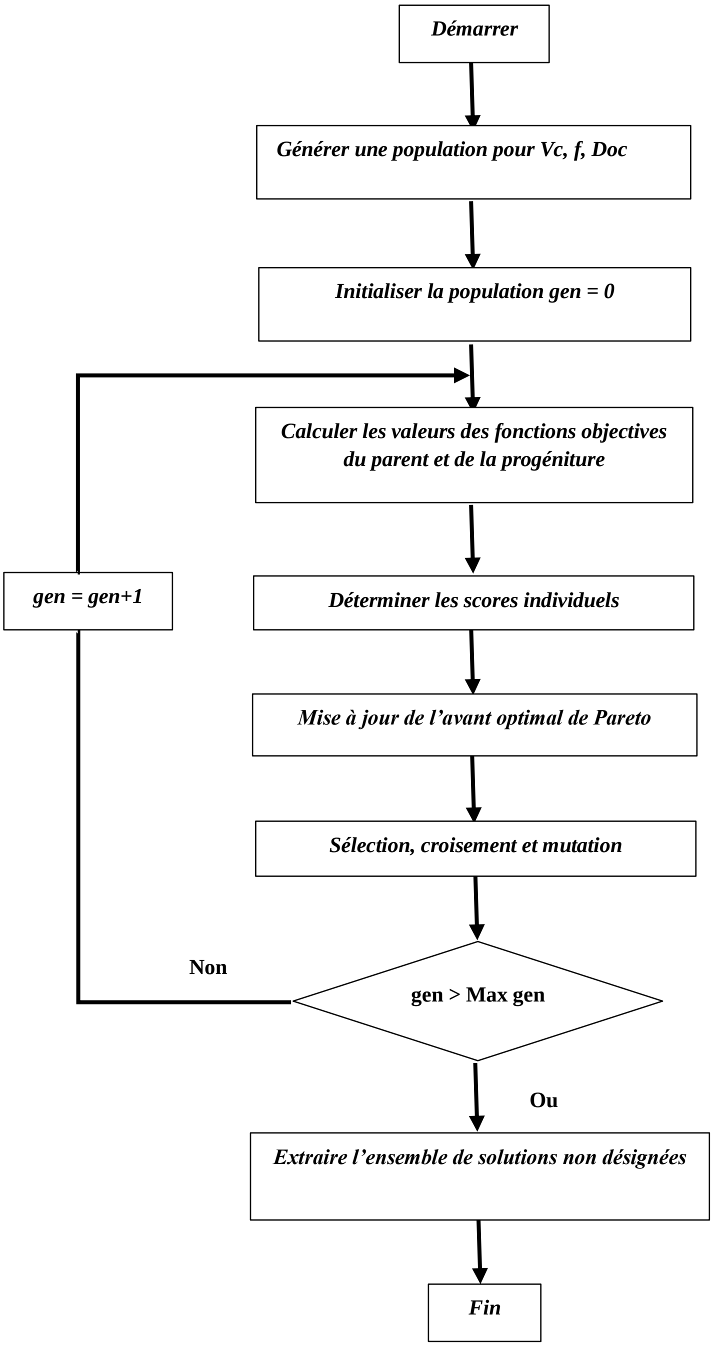


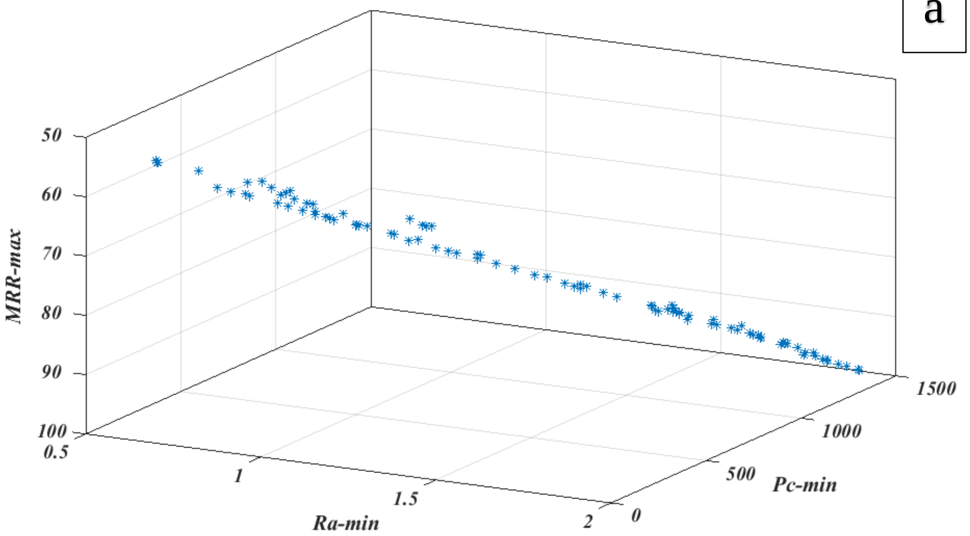
Figure V. 4 *Principe de fonctionnement de NSGA-II* **[115]**.

Les résultats de l'optimisation multi-objectifs obtenus par la méthode (NSGA-II) sont présentés dans la **figure V.5 (a, b, c et d).** Ces graphiques sont très utiles pour le choix des paramètres de coupe optimaux. Chaque étoile dans ces graphes présente un régime optimal obtenu par la méthode NSGA-II basée sur les modèles de (*MSR*), ce régime de coupe est composé de trois paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe). Pour notre cas d'étude on a (*Ra* et *Pc*) à minimiser et le (*MRR*) à maximiser, la vue 3D de front de Pareto, qui comprend 100 solutions non dominées, est présentée dans la **figure V.5-a**. L'analyse des résultats de la figure V.5a montre une diversité de solutions qui peuvent être utilisées selon les besoins. La

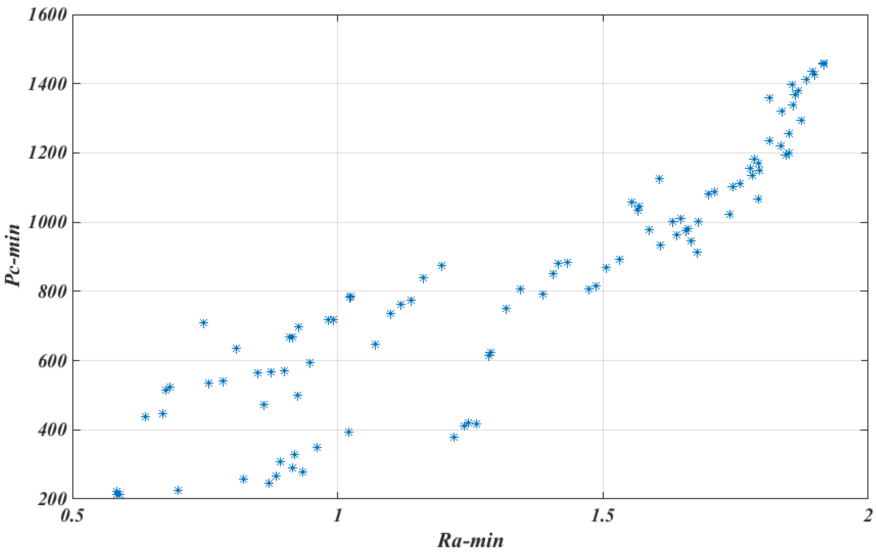
représentation en 2D sur les axes (*Ra-min* et *Pc-min*) est illustrée dans la **figure V. 5-b**. Il est clair que les solutions qui conduisent à des rugosités élevées conduisent aussi à des valeurs de puissance de coupe élevées.

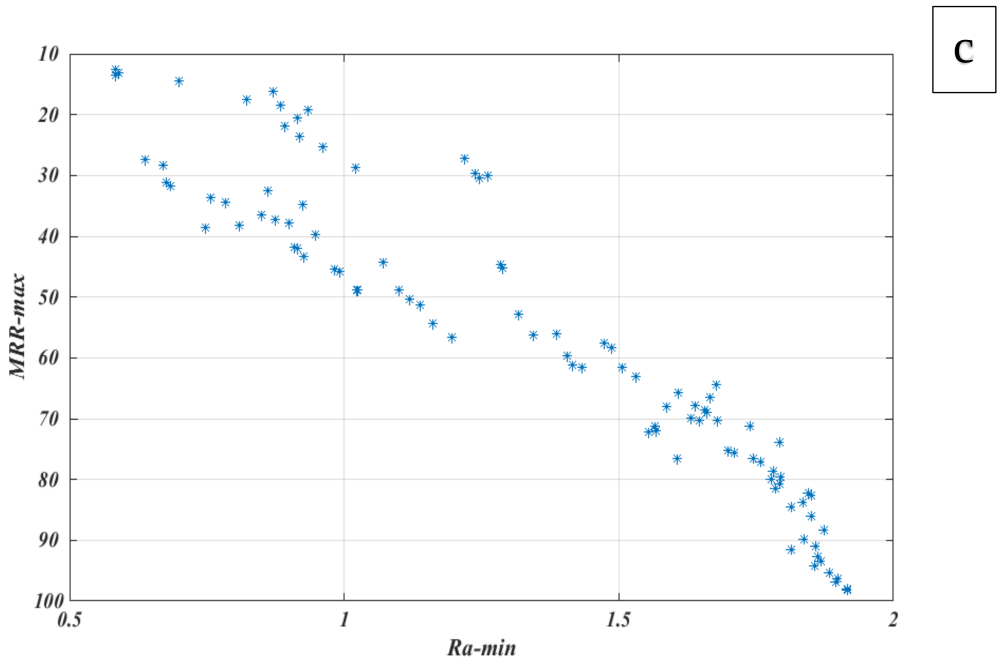
La **figure V.5-c** illustre les solutions de front de Pareto pour la représentation en 2D sur les axes où la minimisation de *Ra* (*Ra*-min) et la maximisation de *MRR* (*MRR*-max). On remarque que les solutions qui conduisent à un MRR maximal ont pour effet de générer des rugosités élevées. Concernant la dernière représentation en 2D où on a la minimisation de *Pc* (*Pc*-min) et la maximisation de *MRR* (*MRR*-max), le front de Pareto est présenté sur la **figure V.5-d**. L'analyse des solutions proposées montre que les solutions qui conduisent à un (MRR) élevé, conduisent à des valeurs de puissance élevées.

a



b





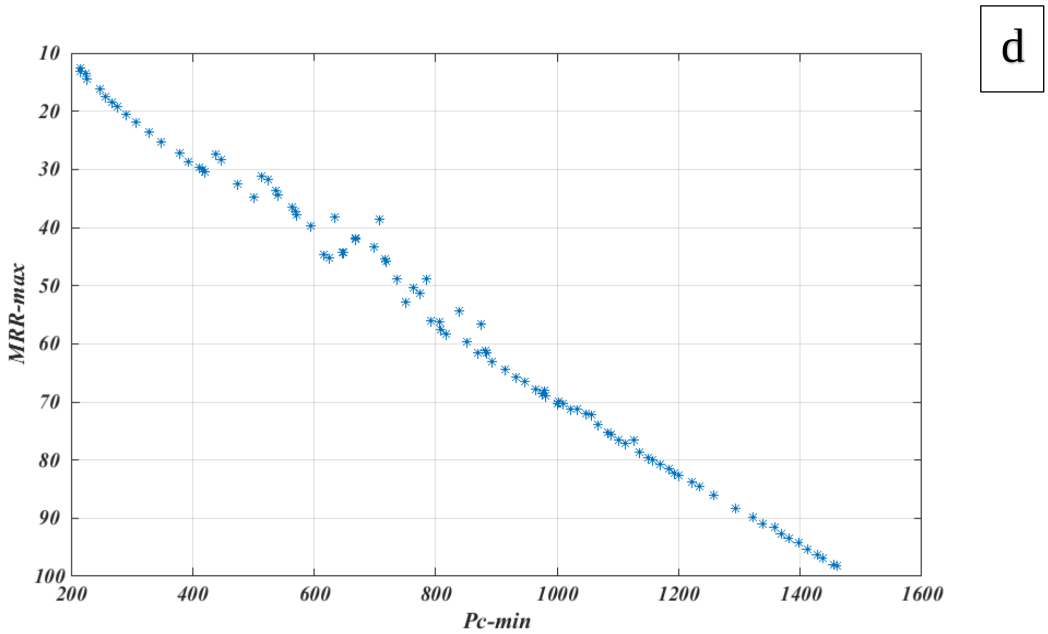


Figure V. 5 *Front non dominé pour (minimiser Ra et Pc, maximiser MRR) pour différentes représentations.*

Le tableau V. 11 illustre quelques régimes optimaux obtenus des 100 solutions proposées par la méthode NSGA-II concernent le cas d'optimisation des paramètres de sortie (*Ra*, *Pc* et *MRR*).

Tableau V. 11 *Quelques régimes optimaux obtenues par la méthode (NSGA-II).*

Vc (m/min)	*f (mm/tr)*	*Doc (mm)*	*Ra (µm)*	*MRR (cm^3/min)*	*Pc (W)*
524.56	0.08	0.32	0.58	13.58	224.63

542.39	0.08	0.30	0.59	13.02	214.45
273.00	0.14	0.46	2.29	17.97	277.22
525.49	0.08	0.30	0.58	12.61	214.58
281.14	0.14	0.47	2.21	18.74	285.32
281.32	0.13	0.45	2.06	16.09	255.81
510.31	0.09	0.75	0.74	33.11	542.58
545.64	0.08	0.64	0.65	27.82	444.25
280.89	0.13	0.45	2.04	15.97	254.57
546.00	0.20	0.90	1.92	98.28	1460.59

Les résultats de l'optimisation par la méthode (NSGA-II) pour le cas de minimisation de la rugosité de surface (*Ra*) et la puissance de coupe (*Pc*) avec la maximisation du débit du coupeau enlevé (*MRR*) sont présentés dans l'annexe I.

V.3.6 Comparaison entre les régimes optimaux multi-objectif

Le tableau V.12 présente une comparaison entre les régimes optimaux obtenus par les différentes méthodes d'optimisation à savoir ; la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA), la technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale (TOPSIS), la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) et algorithme génétique de tri non dominé II (NSGA-II). En premier lieu, d'après le tableau V.10, les trois méthodes (GRA), (DEAR) et (TOPSIS) couplées à la méthode de Taguchi, basée sur le signal/bruit (S/N), fournissent des régimes avec quelques divergences minimes. Pour la méthode GRA, le régime trouvé est (*Vc* = 546 m/min, *f*= 0.08 mm/tr, *Doc*= 0.3 mm), pour la méthode DEAR, le régime sélectionné est (*Vc* = 546 m/min, *f*= 0.14 mm/tr, *Doc*= 0.6 mm), ce qui correspond aux valeurs de sortie, alors que pour la méthode (TOPSIS), le régime trouvé est (*Vc* = 546 m/min, *f*= 0.08 mm/tr, *Doc*= 0.9). Ces différents régimes correspondant aux valeurs de rugosité de surface, puissance de coupe et le débit du coupeau enlevé suivantes :

- Pour GRA, *Ra* =0.7 µm, *Pc*= 268.18 W et *MRR*= 13.10 cm^3/min, elle favorise l'objectif de la minimisation de (*Ra* et *Pc*) sur l'objectif de la maximisation de (*MRR*). Car avec

cette méthode, on a enregistré les meilleures valeurs de (*Ra* et *Pc*) par contre le (*MRR*) s'est trouvé avec sa plus faible valeur comparativement avec les deux autres méthodes.

- Pour la méthode *DEAR*, *Ra* =1.2 µm, *Pc*= 468.01 W et *MRR*= 45.86 cm^3/min. On remarque, que pour cette méthode le (*MRR*) est favorisé par rapport à (*Ra* et *Pc*), parce que l'avance (*f*) et la profondeur de passe (*Doc*) ont pris des valeurs supérieures comparativement au régime de la méthode (GRA).
- Concernant la méthode (TOPSIS), *Ra* =0.79 µm, *Pc*= 700.7 W et *MRR*= 39.31 cm^3/min, il est clair que la variation de profondeur de passe entre les trois méthodes (*Doc* = 0.3 mm pour *GRA*, *Doc* = 0.9 mm pour (TOPSIS) et *Doc* = 0.6 mm pour (DEAR)) provoque une augmentation de la puissance de coupe et le débit du coupeau enlevé. En général, cette méthode offre un régime de coupe intéressant, car il a permis d'obtenir une rugosité faible et une productivité importante.

Concernant les méthodes (DF) et (NSGA-II) qui sont basées sur les modèles mathématiques obtenus par la méthode de surface de réponse, elles offrent plusieurs solutions selon notre objectif. La sélection de régime optimal par la méthode (DF) est la basé sur la plus grande valeur de désirabilité, donc le régime sélectionné est *Vc* = 546 m/min, *f*= 0.107 mm/tr, *Doc*= 0.724 mm qui correspondent au *Ra* =1.089 µm, *Pc*= 633.81 W et *MRR*= 42.32 cm^3/min.

Puisque la méthode (NSGA-II) propose 100 solutions possibles (Annexe I), alors dans notre cas nous avons couplé cette méthode avec la méthode TOPSIS afin de choisir le régime optimal parmi les 100 solutions proposées **[116].** Donc, les 100 solutions ont été considérées comme matrice de décision, et après on a appliqué les étapes de la méthode (TOPSIS). Le régime sélectionné est *Vc* = 546 m/min, *f*= 0.08 mm/tr, *Doc*= 0.64 mm, ce qui correspondent aux valeurs de sortie ; *Ra* =0.65 µm, *Pc*= 444.25 W et *MRR*= 27.82 cm^3/min. Donc, ce régime trouvé est le résultat de couplage entre les méthodes (NSGA-II et TOPSIS). Il a favorisé la rugosité de surface (*Ra*) par rapport au (*MRR*).

On conclusion, si on compare les cinq méthodes d'optimisation utilisées, la vitesse de coupe est restée la même avec une valeur 546 m/min, par contre l'avance varie de 0.08 mm/tr à 0.14 mm/tr et la profondeur de passe varie de 0.3 mm à 0.9 mm. On remarque, que des méthodes d'optimisation ont favorisé la minimisation de la rugosité de surface et des méthodes ont favorisé la productivité maximale.

Tableau V. 12 *Comparaison entre les régimes optimaux.*

	Vc (m/min)	*f (mm/tr)*	*Doc (mm)*	*Ra (µm)*	*Pc (W)*	*MRR (cm^3/min)*
Intervalle de variation / plan L_{27}	273-546	0.08-0.2	0.3-0.9	0.7-3.03	208.25-1434.52	6.55-98.28
DF	546	0.107	0.724	1.089	633.811	42.326
NSGA-II couplée TOPSIS	546	0.08	0.64	0.65	444.25	27.82
TOPSIS	546	0.08	0.9	0.79	700.7	39.312
GRA	546	0.08	0.3	0.7	268.18	13.10
DEAR	546	0.14	0.6	1.2	468.01	45.86

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d’optimisation à savoir : l’optimisation mono-objective, où nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser le volume de copeau enlevé (*MRR*), l’effort de coupe (*Fz*), la rugosité arithmétique (*Ra*) et la puissance de coupe (*Pc*). Optimisation multi-objectif, où nous avons utilisé les méthodes les méthodes ; fonction de désirabilité (DF), Algorithme génétique de tri non dominé -II (NSGA-II), analyse relationnel grise (GRA), La technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale (TOPSIS) et la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR). Le but est de maximiser le débit du coupeau enlevé (*MRR*) et minimiser la puissance de coupe (*Pc*) ainsi que la rugosité arithmétique (*Ra*) simultanément. A la fin une comparaison entre les régimes optimaux obtenus par les cinq méthodes d’optimisation a été réalisée et discutée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude de la performance de l'outil de coupe CBN7050 lors du tournage du fonte grise EN-GJL-250, ont permis en premier lieu d'étudier l'usinabilité de la fonte grise avec le CBN en se basant sur les paramètres de sortie suivants : les efforts de coupe, la rugosité des surfaces usinées, la puissance de coupe et l'effort spécifique, ainsi que l'étude de l'évolution de l'usure et l'analyse de la topographie de surface (3D) de la fonte grise EN-JL-1040 usinée. En deuxième lieu, cette étude, nous a permis de modéliser et de prédire les paramètres de sortie telles que les composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*), les trois critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) et la puissance de coupe à l'aide des méthodes *RSM, ANN* et *ANFIS*. Enfin, une étude d'optimisation des paramètres de coupe a été réalisée par plusieurs approches. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1. Les résultats des essais paramétriques sur les efforts de coupe montrent que :

L'augmentation de la vitesse de coupe (*Vc*) de 194 à 546m/min fait diminuer les trois composantes (*Fx, Fy* et *Fz*) respectivement de 28.42%, 45.71% et 30.47%. Les efforts de coupe sont influencés par l'avance, un accroissement de (*f*) de 0,08 à 0,2 mm/tr conduit à une élévation de l'effort de coupe (*Fy*) de 290.26%, les deux autres composantes (*Fx*) et (*Fz*) de (182.24%, 229.02%) successivement. Quand la profondeur de passe (*Doc*) varie de 0,3 à 1.2 mm, les trois composantes de l'effort de coupe (*Fx, Fy* et *Fz*) augmentent de 46.99%, 227.09% et 160% respectivement. On note que l'effort de coupe (*Fy*) est le plus sensible à l'augmentation de (*f*) et (*Doc*).

2. Les résultats des essais paramétriques sur les critères de rugosité de surface dévoilent que :

La vitesse de coupe (*Vc*) a une influence décroissante sur les critères (*Ra, Rz* et *Rt*). Une augmentation de la vitesse de coupe de 194 à 546 m/min fait diminuer les différents critères de rugosité respectivement de (50.74 %, 52.59% et 55.02%). L'avance (*f*) a un impact très important sur les critères de rugosité de surface. Une augmentation de (*f*) de 0.08 à 0.28 mm/tr conduit une augmentation des critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) de (295.04, 212.52 et 284.12) % respectivement. La profondeur de passe (*Doc*) a un faible effet sur (*Ra, Rz* et *Rt*). Donc l'augmentation de (*Doc*) de 0,3 à 1.2mm conduit à une légère augmentation des critères (*Ra, Rz* et *Rt)* de (17.11%, 7.28%, 21 et 12.22%) respectivement.

3. L'effet des paramètres de coupe sur l'effort spécifique de coupe (*Ks*) ont montré que :

L'effort spécifique de coupe diminue avec l'augmentation de (*Vc*). Une variation de la vitesse de coupe de 194 à 546m/min conduit à une diminution de l'effort spécifique de 72.83%. D'autre part l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.24mm/tr implique une diminution de l'effort spécifique de coupe de 19.9%. Aussi, l'accroissement de (*Doc*) de 0.3 à 1.2mm conduit à une diminution de l'effort spécifique de coupe de 35%. Plus l'effort spécifique de coupe diminue, plus l'arête de coupe de l'outil travail dans des conditions favorables et moins sévères.

4. Concernant la puissance de coupe (*Pc*), l'augmentation des différents paramètres de coupe (*Vc*, *f* et *Doc*) conduit à une élévation de la puissance de coupe. Un accroissement de (*Vc*) de 194 m/min à 546 m/min fait augmenter la puissance de coupe jusqu'au 95.67%. Lorsque l'avance augmente de de 0.08 à 0.24mm/tr, la puissance (*Pc*) croit jusqu'au 229.0.2%. Une variation de la profondeur de passe de 0.3 à 1.2 mm conduit à une augmentation de puissance de 160%.
5. L'outil CBN7050 a prouvé ses hautes performances en usinant à des vitesses de coupe assez élevées et en obtenant un très bon état de surface avec une résistance à l'usure relativement bonne. Il a atteint une durée de vie de 41,5 min, 18 min et 7 min pour (*Vc*) correspondant à 450 m/min, 600 m/min et 750 m/min respectivement.
6. Les résultats de l'usure en fonction de la rugosité de surface montrent que (*Ra*) n'a pas dépassé la valeur de 1.5 µm durant toute la période utile d'usinage.

7. En utilisant la plateforme Altisurf@500, l'analyse de surface 3D a permis une nouvelle approche métrologique capable de mieux caractériser la topographie de surface et d'obtenir une cartographie 3D par la mesure de profils successifs. Les résultats ont montré que la rugosité (*Ra*) devient plus élevés pour des valeurs d'avance (*f*) plus élevées, le ratio $Ra_{(f=0.24)}/Ra_{(f=0.08)} = 4.17$ *pour* (*Vc*) = *382m/min et* le ratio $Ra_{(f=0.20)}/Ra_{(f=0.11)} = 1.29$ *pour* (*Vc*) = 450m/min. On peut apercevoir aussi que les surfaces usinées sont constituées de pics et de creux dans une plage de sillons le long de la direction d'avance.
8. Les résultats de l'ANOVA pour les efforts de coupe (*Fx*, *Fy* et *Fz*) ont montré que (*Doc*) et (*f*) ont les effets les plus significatifs sur (*Fx*, *Fy* et *Fz*). La profondeur de passe (*Doc*), s'est avéré le facteur le plus important avec une contribution de (79.15, 54.09 et 54.53) %. Le deuxième facteur le plus important influençant les efforts de coupe est l'avance (*f*) suivie par la vitesse (*Vc*), leurs contributions sont de (7.43, 35.02 et 32.47) % et (5.29, 3.62 et 1.68) % respectivement. Les interactions (*Vc**Doc*) et (Doc^2) ont un impact significatif sur (*Fx*) avec des contributions faibles de 1.465% et 1.546% successivement, les termes (*f* **Doc*) et (Doc^2)

ont aussi un faible effet sur (Fy) avec des contributions de (2.25% et 1.10%) et l'interaction (*f* **Doc*) a un impact significatif sur (*Fy*) avec contribution de 5.15%.

9. Les résultats de l'ANOVA pour les critères de rugosité (*Ra, Rz* et *Rt*) ont dévoilé que (*f*) et (*Vc*) ont un effet significatif sur (*Ra, Rz* et *Rt*). Néanmoins, (*f*) est le plus important paramètre influe sur la rugosité des contributions de (63.64, 66.93 et 53.03) %. Le facteur suivant le plus important influençant sur les efforts de coupe est (*Vc*), leurs contributions sont de (27.97, 26.05 et 37.32) % respectivement. L'interaction (*Vc***f*) et les deux produit (Vc^2) et (f^2) ont un impact significatif sur (*Rz*) avec des contributions de (0.79%, 1.87% et 0.80%) successivement. Aussi, les termes (*Vc***f*) et (Vc^2) ont aussi un faible effet sur (*Rt*) avec des contributions de (1.95% et 3.20%) et la profondeur de passe (*Doc*) a un impact très faible sur les critères (*Ra, Rz* et *Rt*).
10. Les résultats de l'ANOVA de la puissance de coupe (*Pc*) prouvent que tous les paramètres de coupe sont significatifs. Le paramètre plus important est la profondeur de passe (*Doc*), suivi par l'avance (*f*) et la vitesse de coupe (*Vc*), leurs contributions sont de (46.40%, 27.40, et 13.93%) respectivement. Les interactions (*Vc***f*), (*Vc***Doc*) et (*f* **Vc*) ont des faibles contributions de (1.86, 3.52 et 4.14) %. Les autres produits n'ont pas d'effet significatif sur la puissance de coupe (*Pc*).
11. Les modèles mathématiques développés par les deux méthodes *RSM* et *ANN* pour la prédiction (*Ra, Fz* et *Pc*) sont très utiles pour la prédiction. Une corrélation étroite entre les valeurs prédites et mesurées a été trouvée, avec des valeurs (R^2) allant de (0,95 à 0,99). D'autre part, le coefficient de détermination obtenue par la méthode ANFIS pour les deux paramètres (*Fz* et *Ra*) atteint la valeur 1.
12. La comparaison entre les deux techniques *RSM* et *ANN* montre que l'approche *RSM* a une faible capacité de prédiction par rapport à la méthode *ANN*, cependant *RSM* est très utile en termes d'identification des contributions des paramètres principaux et leurs interactions.
13. L'optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi donne la combinaison optimale des paramètres de coupe suivante :

- Minimisation du *Fz Vc*=546 m/min, *f*=0.08 mm/tr et *Doc*=0.3 mm.
- Minimisation du *Ra* : *Vc* = 546m/min, à *f* = 0.08 mm/tr et *Doc* = 0.6mm.
- Minimisation du *Pc* :*Vc* = 273m/min. *f* = 0.08 mm/tr et *Doc* = 0.3mm.
- Maximisation du *MRR* : *Vc* = 546m/min. *f*= 0.2 mm/tr et *Doc*= 0.9 mm.

14. L'optimisation multi-objectifs en utilisant l'approche de la fonction de désirabilité (DFA) s'est avérée être un outil utile qui conduit à proposer des régimes optimaux pour quatre objectifs souhaités.

- *MRR******(max) et *Ra**(min) : *Vc*= 546 m/min, *f* =0.2mm/tr et *Doc*=0.9mm.
- *MRR**(max) et *Ra******(min): *Vc*= 522 m/min, *f* =0.08mm/tr et *Doc*=0.9mm.
- *MRR******(max) et *Ra******(min): *Vc*= 546 m/min, *f* =0.156 mm/tr et *Doc*=0.9mm.
- *Fz******(min) et *Pc******(min): *Vc*= 546 m/min, *f* =0.08 mm/tr et *Doc* =0.3mm.
- *Ra******(min), *Fz******(min) et *MRR******(max) : *Vc*= 546 m/min, *f*=0.08 mm/tr et *Doc* =0.3mm.

15. Optimisation multi-objectif en appliquant les méthodes GRA, DEAR et TOPSIS pour optimiser (*MRR*-max), la rugosité de surface (*Ra*-min) et la puissance de coupe (*Pc*-min) simultanément donne les combinaisons optimales suivantes :
   - **Méthode GRA :** *Vc* = 546m/min, *f* = 0.08 mm/tr et *Doc* = 0.3 mm avec des valeurs de *Ra*= 0.7 µm, *MRR* = 11.74 cm^3/min et *Pc* = 272.15 W.
   - **Méthode DEAR:** *Vc*=546 m/min, *f*=0.14 mm/tr et *Doc*=0.6 mm avec *Ra* = 1.2 µm, *MRR* = 45.86 cm^3/min et *Pc* = 468.01 W.
   - **Méthode TOPSIS:** *Vc*=546 m/min, *f*=0.14 mm/tr et *Doc*=0.3 mm avec *Ra* = 0.79 µm, *MRR* = 39.31 cm^3/min et *Pc* = 700.7 W.

16. L'optimisation multi-objectifs en appliquant la méthode NSGA-II pour optimiser simultanément (*MRR*-max, *Ra*-min et *Pc*-min) nous donne plusieurs choix de combinaisons. Pour la sélection d'un régime optimal parmi les 100 solutions, on a coupler la méthode NSGA-II avec la méthode TOPSIS. Ce couplage des méthodes fournie le régime suivant : *Vc* = 546 m/min, *f*= 0.08 mm/tr, *Doc*= 0.64 mm, ce qui correspondent aux valeurs de sortie ; *Ra* =0.65 µm, *Pc*= 444.25 W et *MRR*= 27.82 cm^3/min.
17. La comparaison entre les cinq méthodes d'optimisation utilisées, montre que la vitesse de coupe est restée la même (546 m/min), par contre l'avance varie de 0.08 mm/tr à 0.14 mm/tr et la profondeur de passe varie de 0.3 mm à 0.9 mm. Aussi, on remarque que des méthodes d'optimisation ont favorisé la minimisation de la rugosité de surface et des méthodes ont favorisé la productivité maximale.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Etude de l’effet de lubrification et minimum quantité de lubrification (MQL) sur la performance de CBN lors l’usinage des fontes.
- L’application des autres méthodes d’optimisation telle que (La logique flou et PSO, MOORA, WASPAS …etc).

Références bibliographiques

[1] **Youssef, H. A., El-Hofy, H. A.,** and **Ahmed, M. H.** (2011). Manufacturing technology: materials, processes, and equipment. *Crc Press*.

[2] **Baptista, R.,** and **Simoes, J. A.** (2000). Three and five axes milling of sculptured surfaces. *Journal of materials processing technology*, *103*(3), 398-403.

[3] **Hamdy K., Mohamed M.K., Abouelmagd G.**, New electrode profile for machining of internal cylindrical surfaces by electrochemical drilling, *Int. J. Control. Autom*. Syst. 2 (2013) 2165–8277

[4] **Fan, W., Ji, W., Wang, L., Zheng**, **L.,** and **Wang, Y.** (2020). A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(11), 2863-2879.

[5] **Venkatesan, K.** (2017). The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd: YAG laser source. *Journal of advanced research*, 8(4), 407-423.

[6] **Zheng, H.,** and **Liu, K.** (2013). Machinability of engineering materials. *Handbook of manufacturing engineering and technology*, 1-34.

[7] **Sandvik coromant**.http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide / spa/MTG_H..PDF

[8] **BAGUR F**, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.

[9] **BELHADI S**, (2009). Etude de l'usinage des aciers traites lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[10] **CHANCEL P**, (1995). Les nouveaux outils coupants, CETIM information N° 147, Février.

[11] **AOUICI H**, (2013). Production Mécanique II, Ecole nationale supérieure de technologie.

[12] http://www.ceramique-et-faience.com/nitrure_de_bore.php

[13] **GUIOT E**, (2000). Quelques aspects de la formation de films minces de nitrure de bore cubique, obtenus par dépôt physique en phase vapeur assiste par faisceau d'ions, Thèse Docteur en Sciences, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Cluny.

[14] **Prengel, H., Jindal, P., Wendt, K., Santhanam, A., Hegde, P.,** and **Penich, R**. (2001). A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 139(1), 25–34. doi:10.1016/s0257-8972(00)01080-x.

[15] http://outillage.otelo.fr/documents/le-revetement-des-outils-de-coupe/80.html.

[16] **Bouzakis KD., Michailidis N., Skordaris G., Bouzakis E.** (2014). Coated Tools. In: The International Academy for Production Engineering, Laperrière L., Reinhart G. (eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6395.

[17] https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-iron.

[18] **An W-k., Cai A-h., Luo Y., Chen H., Liu W-x., Li T-l., Chen M.(2009).** Optimization of composition of as-cast chromium white cast iron based on wear-resistant performance. *Materials and Design*, vol. 30, 2339–2344.

[19] https://www.rocdacier.com/les-alliages-binaires-et-diagramme-fer-carbone/

[20] **Cohen PH, Voigt RC** (2003). Influence of section size on machinability of ductile irons. *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*.

[21] **Cristopher J, Grabel J** (2003) Machining and grinding of iron castings. *Castings Engineering Handbook.*

[22] **Callister WD,** (2006). Materials science and engineering—an introduction. *Editora McGrall-Hill*., 7ª ed., 832 p.

[23] https://metalblog.ctif.com/2021/03/01/les-fontes-a-graphite-lamellaire-et-spheroidal/

[24] http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/les-fontes-blanches.html.

[25] **Čanžar, P., Tonković, Z.,** and **Kodvanj, J.** (2012). Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 556, 88-99.

[26] **Marghitu, D. B.** (2001). Mechanical engineer's handbook. *Elsevier*.

[27] **Souza, J. V. C., Nono, M. C. A., Ribeiro, M. V., Machado, J. P. B.,** and **Silva, O. M. M.** (2009). Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials & Design*, 30(7), 2715-2720.

[28] **Castillo, WJG** (2005). Perçage profond de la fonte grise GG25 avec forets en carbure à canaux droits.

[29] **Marwanga RO, Voigt RC, Cohen PH** (2001) Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of grey irons. *Trans Am Foundry Soc* 107:595–607.

[30] **Čerče, L.,** and **Pušavec, F.** (2016). Increasing machinability of grey cast iron using cubic boron nitride tools: *Evaluation of wear mechanisms*.Vol.23, pp.65-78.

[31] **Garant-Tools, D.** (2007). Manuel d'usinage GARANT. *Principes de base*, 142-152.

[32] **SALAIMIA A,** (2017) ''Etude de l'usinage des aciers inoxydables lors du fraisage de face'' Thèse de doctorat de Productique, Université 08 mai 1945 -Guelma.

[33] **DEPEYRE P.**, Fabrication Mécanique, Université de la Réunion, Faculté des Sciences et Technologies, 2004-2005.

[34] **Kaya, E.,** and **Akyüz, B.** (2017). Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based super-alloys: a review. *Open Engineering*, 7(1), 330-342 10.1515/eng-2017-0037.

[35] https://docplayer.fr/52576792-Manuel-technique-tournage-gorges-et-filetage.html

[36] **Adilson J. O., Anselmo E. D., Davi J. U.** (2009) Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 209, Issues 12–13, P. 5262-5270.

[37] **CHRISTIAN PAGÈS,** (2003) Comportement de revêtements céramique sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat, École centrale.

[38] **Rech, J.** (2002). Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[39] **ZERTI O.**, Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA, DOCTEUR 3éme cycle, L'université de 8 Mai 1945 Guelma.

[40] **CHEVALIER A. (2004).** Guide du dessinateur industriel, Hachette technique - édition -.

[41] **Bedrin C., Roumesy B.** (1989) Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon.

[42] htt//pactu-imprimante3d.blogspot.com/2014/11/technique-impression-3d-rugosite-etats.

[43] **VASQUES B.** (2008). Etude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage sec, Université François- Rabelais de Tours-.

[44] **YALLESE M. A**, (2005) Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, THESE de Docteur UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[45] **Jawahir I. S.** and **Luttervelt C. A. van**. (1993). Recent developments in chip control research and applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 42(2):659 – 693.

[46] **Battaglia, J. L., Cois, O., Puigsegur, L., Oustaloup, A.,** (2001). Solving an inverse heat conduction problem using a non-integer identified model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 2671-2680.

[47] **Bonifacio MER, Diniz AE** (1994) Correlating tool wear, tool life, surface roughness, and vibration in finish turning with coated carbide tools. *Wear* 173:137–144

[48] **Gastel, M., Konetschny, C., Reuter, U., Fasel, C., Schulz, H., Riedel, R.,** and **Ortner, H. M.** (2000). Investigation of the wear mechanism of cubic boron nitride tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials,* 18(6), 287-296.

[49] **Souza Jr, A. M., Sales, W. F., Santos, S. C.,** and **Machado, A. R.** (2005). Performance of single Si3N4 and mixed Si3N4+ PCBN wiper cutting tools applied to high speed face milling of cast iron. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(3), 335-344.

[50] **Thamizhmanii, S.,** and **Hasan, S.** (2006). Analyses of roughness, forces and wear in turning gray cast iron. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 17(1-2), 401-404.

[51] **Pereira, A. A., Boehs, L.,** & **Guesser, W. L.** (2006). The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25. *Journal of materials processing technology*, 179(1-3), 165-171.

[52] **Camusçu N** (2006). Effect of cutting speed on the performance of Al2O3 based ceramic tools in turning nodular cast iron. *Int J Iron Steel Res* 10:997–1006.

[53] **Souza, J. V. C., Nono, M. C. A., Ribeiro, M. V., Machado, J. P. B.,** and **Silva, O. M. M.** (2009). Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials & Design,* 30(7), 2715-2720.

[54] **Yücel, E.,** and **Günay, M.** (2013). Modelling and optimization of the cutting conditions in hard turning of high-alloy white cast iron (Ni-Hard). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(10), 2280-2290.

[55] **Kulkarni, P. P., Kiran, J. O.,** and **Deeleepkumar, S. G.** (2014). Effect of tool nose radius and cutting parameters on tool life, surface roughness in turning of grey cast iron. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 6(3), 69.

[56] **Fiorini, P.,** and **Byrne, G.** (2016). The influence of built-up layer formation on cutting performance of GG25 grey cast iron. *CIRP Annals*, 65(1), 93-96.

[57] **Chen, J., Liu, W., Deng, X.,** and **Wu, S.** (2016). Tool life and wear mechanism of WC–5TiC–0.5 VC–8Co cemented carbides inserts when machining HT250 gray cast iron. *Ceramics international*, 42(8), 10037-10044.

[58] **Ghani, J. A., Rizal, M.,** and **Haron, C. H. C.** (2014). Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of cleaner production*, 85, 289-292.

[59] **Li, B.** (2014). An experimental investigation of dry cutting performance for machining gray cast iron with carbide coating tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8), 1093-1098.

[60] **Gutnichenko, O., Bushlya, V., Zhou, J.,** and **Ståhl, J. E.** (2017). Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with pcBN tools. *Wear*, 390, 253-269.

[61] **Sousa, T. A., De Paula, M. A., Konatu, R. T., Ribeiro, M. V., De Campos, E.,** and **Souza, J. V. C.** (2019). Investigation of the performance of ceramic tools of alumina doped with magnesium oxide in the dry machining of compacted graphite iron. *Materials Research Express*, 6(4), 046546.

[62] **Kalyon, A., Günay, M.,** and **Özyürek, D.** (2018). Application of grey relational analysis based on Taguchi method for optimizing machining parameters in hard turning of high chrome cast iron. *Advances in Manufacturing*, 6(4), 419-429.

[63] **Meddour, I., Yallese, M. A., Bensouilah, H., Khellaf, A.,** and **Elbah, M.** (2018). Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5), 1931-1949.

[64] **Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Belhadi, S.,** and **Haddad, A.** (2019). Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1), 523-548.

[65] **Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Khellaf, A.,** and **Haddad, A.** (2019). Comparative study of the performance of coated and uncoated silicon nitride (Si 3 N 4) ceramics when machining EN-GJL-250 cast iron using the RSM method and 2D and 3D roughness functional parameters. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(5), 205.

[66] **Tooptong, S., Park, K. H., Lee, S. W.,** and **Kwon, P. Y.** (2016). A preliminary machinability study of flake and compacted graphite irons with multilayer coated and uncoated carbide inserts. *Procedia Manufacturing*, 5, 644-657.

[67] **Kumar, K. M., Arun, K., Sathishkumar, N., Narayanan, M. P.,** & **Raviraj, E.** (2020). Experimental investigation on the machinability of nodular ductile iron with cubic boron nitride and tungsten carbide inserts. *Materials Today: Proceedings.* https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.862.

[68] **Lakhdar, B., Athmane, Y. M., Salim, B.,** and **Haddad, A.** (2020). Modelling and optimization of machining parameters during hardened steel AISID3 turning using RSM, ANN and DFA techniques: Comparative study. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(2), 6835-6847.

[69] **Sada, S. O.,** and **Ikpeseni, S. C.** (2021). Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance. *Heliyon*, 7(2), e06136.

[70] **Umamaheswarrao, P., Rangaraju, D., Suman, K. N. S.,** and **Ravisankar, B.** (2021). Application of TOPSIS for multi response optimization of Process Parameters in dry hard turning of AISI 52100 steel. INCAS Bulletin, 13(1), 211-224.

[71] https://www.altimet.fr/?page_id=234.

[72] **Toh CK** (2004) Static and dynamic cutting force analysis when high-speed rough milling hardened steel. *Materials and Design* 25(1); 41-50. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016.

[73] **Yigit R, Celik E, Findik F, Koksal S** (2008) Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 26(6): 514-524. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.12.003.

[74] **Parhad P, Dakre V, Likhite A, Bhatt J** (2019) The impact of cutting speed and depth of cut on cutting force during turning of austempered ductile iron. *Materials Today: Proceedings* 19: 663-669. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.750.

[75] **Yallese MA, Chaoui K, Zeghib N, Boulanouar L, Rigal JF** (2009) Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of materials processing technology* 209(2):1092-1104.

[76] **Fnides B, Aouici H, Elbah M, Boutabba S, Boulanouar L** (2015) Comparison between mixed ceramic and reinforced ceramic tools in terms of cutting force components modeling and optimization when machining hardened steel AISI 4140 (60 HRC). *Mechanics and Industry* 16(6): 609. 10.1051/meca/2015036.

[77] **Aouici H, Elbah M, Yallese MA, Fnides B, Meddour I, Benlahmidi S** (2016) Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: analysis of machining forces and flank wear. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87(5-8): 2221-2244. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8567-7.

[78] **Yallese MA, Boulanouar L, Belhadi S, Ouelaa N** (2007) INFLUENCE DES CONDITIONS D'USINAGE SUR LES EFFORTS DE COUPE LORS DU TOURNAGE DU 100Cr6 (60HRC) AVEC LE CBN. *Sciences and Technologie. B, Sciences de l'ingénieur* 7-13.

[79] **Guo Y, Loenders J, Duflou J, Lauwers B** (2012) Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning. *Procedia CIRP* 1:512-517. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.091.

[80] **Şahinoğlu, A.,** and **Ulas, E.** (2020). An investigation of cutting parameters effect on sound level, surface roughness, and power consumption during machining of hardened AISI 4140. *Mechanics & Industry*, 21(5), 523.

[81] **Yigit R, Celik E, Findik F, Koksal S** (2008) Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 26(6): 514-524. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.12.003.

[82] **Bouchelaghem H, Yallese MA, Mabrouki T, Amirat A, Rigal JF** (2010) Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology* 14(4) :471-501. https://doi.org/10.1080/10910344.2010.533621.

[83] **Chen, T, Li, S, Han, B, Liu, G** (2014) Study on cutting force and surface micro-topography of hard turning of GCr15 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72(9-12): 1639-1645. 10.1007/s00170-014-5778-7.

[84] **Yallese MA, Rigal JF, Chaoui K, Boulanouar L** (2005) The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 219(1): 35-55. 10.1243/095440505X8082.

[85] **Bouchelaghem, H, Yallese, MA, Amirat, A, Belhadi, S** (2007) Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Mechanics* 65(3): 57-65.

[86] **Selaimia AA, Yallese MA, Bensouilah H, Meddour I, Khattabi R, Mabrouki T** (2017) Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless-steel using RMS and desirability approach. *Measurement* 107:53-67. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.012.

[87] **Bensouilah H, Aouici H, Meddour I, Yallese MA, Mabrouki T, Girardin F** (2016) Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. *Measurement* 82: 1-18. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.042.

[88] **Bouacha K, Yallese MA, Khamel S, Belhadi S** (2014) Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 45: 160-178. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.04.014.

[89] **Bouacha K, Yallese MA, Mabrouki T, Rigal JF** (2010) Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 28(3): 349-361. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011.

[90] **Abdallah, F., Abdelwahab, S. A., Fatouh, Y.,** and **Ahmed, I.** (2019). Modeling and Simulation of Cutting Tool Temperature in Turning Process of C45 Alloy Steel Using Artificial Neural Network (ANN).

[91] **Jang, J. S.** (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.

[92] **Takagi, T.,** and **Sugeno, M.** (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), 116-132.

[93] **Palani, S., Natarajan, U.,** and **Chellamalai, M.** (2013). On-line prediction of micro-turning multi-response variables by machine vision system using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Machine Vision and Applications*, 24(1), 19-32.

[94] **Zhang, L., Xiong, G., Liu, H., Zou, H.,** and **Guo, W.** (2010). Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 6077-6085.

[95] **LAOUISSI, A.** (2019). Etude du comportement du couple fonte/céramique en nitrure de silicium (Si3N4) revêtue et non revêtue, en sollicitations sévères lors du tournage-Modélisation et Optimisation (Doctoral dissertation).

[96] **Li, J.,** and **Laghari, R. A.** (2019). A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9), 2929-2943. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2837-5.

[97] **Rao, R. V.,** and **Kalyankar, V. D.** (2014). Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 1159-1188. 10.1007/s00170-014-5894-4.

[98] **Nalbant, M., Gökkaya, H.,** and **Sur, G.** (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & design*, 28(4), 1379-1385. 10.1016/j.matdes.2006.01.008.

[99] **Sharma, R. C., Dabra, V., Singh, G., Kumar, R., Singh, R. P.,** and **Sharma, S.** (2021). Multi-response optimization while machining of stainless steel 316L using intelligent approach of grey theory and grey-TLBO. *World Journal of Engineering*.

[100] **Taguchi G**, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organisation, Tokyo 1986.

[101] **Zhang JZ, Chen JC, Kirby ED,** Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method, *J Mater Process Technol* 184 233 – 239, 2007.

[102] **Günay M, Kaçal A, Turgut Y**, Optimization of machining parameters in milling of Ti – 6Al – 4 V alloy using Taguchi method, *E-J New World Sci Acad Eng Sci* 6 (1) 428 – 440, 2011.

[103] **Rowlands H, Antony J, Knowles G,** (2000). An application of experimental design for process optimization. *TQM Mag* 12(2):78 – 83.

[104] **Bendell A, Disney J, Pridmore WA**, Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford 1989.

[105] **Nalbant M, Gökkaya H, Sur G**, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Mater Des* 28:1379 – 1385, 2007.

[106] **Bhaskar, P., & Sahoo, S. K.** (2020). Optimization of Machining Process by Desirability Function Analysis (DFA): A Review. *CVR Journal of Science and Technology*, 18(1), 138-143.

[107] **Frifita, W., Salem, S. B., Haddad, A.,** and **Yallese, M. A.** (2020). Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 Nickel-base super alloy. *Mechanics & Industry*, 21(2), 203.

[108] **Dabade, U. A.** (2013). Multi-objective process optimization to improve surface integrity on turned surface of Al/SiCp metal matrix composites using grey relational analysis. *Procedia CIRP*, 7, 299-304.

[109] **JUNANKAR, A., YASHPAL, J. P., MAHESHWARY, P.,** and **BHENDE, N.** (2020). OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS DURING TURNING OF BEARING

STEEL USING TAGUCHI-GRA TECHNIQUE. *International Journal of Mechanical and Production*, Vol. 10, Issue 3, 12845-12856.

[110] **Phan, N. H.,** and **Muthuramalingam, T.** (2020). Multi criteria decision making of vibration assisted EDM process parameters on machining silicon steel using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 1-7.

[111] **Rao, C. M.,** and **Subbaiah, K. V.** (2020). Optimization of Wire EDM Process Parameters in Machining SS316 Using DEAR Method. *Journal of Recent Trends in Mechanics*, Volume-5, Issue-3.

[112] **Divya C., Raju L.S., Singaravel B.** (2020). A Review of TOPSIS Method for Multi Criteria Optimization in Manufacturing Environment. In: Dawn S., Balas V., Esposito A., Gope S. (eds) *Intelligent Techniques and Applications in Science and Technology. ICIMSAT 2019. Learning and Analytics in Intelligent Systems*, vol 12. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42363-6_84.

[113] **Tamiloli, N., Venkatesan, J., Murali, G., Kodali, S. P., Kumar, T. S.,** and **Arunkumar, M. P.** (2019). Optimization of end milling on Al–SiC-fly ash metal matrix composite using Topsis and fuzzy logic. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1-15.

[114] **Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S.,** and **Meyarivan, T. A. M. T.** (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.

[115] **Kanagarajan, D., Karthikeyan, R., Palanikumar, K.,** and **Davim, J. P.** (2008). Optimization of electrical discharge machining characteristics of WC/Co composites using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(11-12), 1124-1132.

[116] **Sen, B., Hussain, S. A. I., Mia, M., Mandal, U. K.,** and **Mondal, S. P.** (2019). Selection of an ideal MQL-assisted milling condition: an NSGA-II-coupled TOPSIS approach for improving machinability of Inconel 690. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5), 1811-1829. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03620-6.

Tableau Résultats NSGA-II

Vc (m/min)	*f (mm/tr)*	*Doc (mm)*	*Ra (µm)*	*MRR (cm^3/min)*	*Pc (W)*
546,00	0,20	0,90	1,92	98,28	1460,59
546,00	0,20	0,90	1,92	98,28	1460,59
524,56	0,08	0,32	0,58	13,58	224,63
542,39	0,08	0,30	0,59	13,02	214,45
273,00	0,14	0,46	2,29	17,97	277,22
525,49	0,08	0,30	0,58	12,61	214,58
281,14	0,14	0,47	2,21	18,74	285,32
281,32	0,13	0,45	2,06	16,09	255,81
510,31	0,09	0,75	0,74	33,11	542,58
545,64	0,08	0,64	0,65	27,82	444,25
280,89	0,13	0,45	2,04	15,97	254,57
546,00	0,20	0,90	1,92	98,28	1460,59
546,00	0,17	0,79	1,66	74,51	1075,17
519,77	0,14	0,44	1,24	31,35	429,79
517,24	0,14	0,40	1,25	28,52	396,16
546,00	0,14	0,84	1,38	64,39	957,01
519,98	0,11	0,82	1,08	48,44	745,54
523,21	0,18	0,82	1,70	75,97	1108,87
538,30	0,18	0,87	1,77	85,57	1261,04
519,58	0,14	0,38	1,25	26,92	377,11
546,00	0,08	0,39	0,62	17,62	266,48
542,76	0,11	0,41	0,99	25,43	350,03
512,89	0,12	0,61	1,05	36,56	515,07
542,07	0,19	0,86	1,80	87,17	1281,54
521,37	0,11	0,86	1,07	49,80	788,62
545,57	0,16	0,74	1,54	65,46	932,86
524,97	0,11	0,40	0,95	22,97	321,47
543,06	0,20	0,88	1,90	95,54	1416,16
532,82	0,10	0,30	0,79	15,43	237,09
522,67	0,09	0,84	0,85	40,43	675,76
537,21	0,18	0,86	1,76	84,51	1243,62
526,60	0,10	0,39	0,81	20,31	292,10
522,99	0,18	0,82	1,72	77,04	1125,07
480,40	0,14	0,68	1,30	44,81	633,61
521,87	0,12	0,87	1,19	55,50	861,67
526,82	0,11	0,41	0,96	24,26	337,03
278,85	0,14	0,45	2,26	17,98	277,90
522,99	0,09	0,84	0,87	41,32	689,57
546,00	0,08	0,90	0,76	39,31	729,28
546,00	0,16	0,77	1,57	68,91	989,81
511,00	0,11	0,58	1,00	33,58	472,14

522,05	0,15	0,84	1,50	68,01	1002,67
522,87	0,14	0,82	1,36	59,98	885,15
521,88	0,18	0,86	1,75	81,94	1210,79
509,38	0,09	0,81	0,82	37,80	628,10
522,96	0,10	0,83	0,92	42,94	699,53
537,78	0,11	0,85	1,12	52,55	822,68
526,46	0,11	0,38	0,89	21,34	302,36
523,14	0,08	0,86	0,77	38,04	668,55
545,95	0,20	0,90	1,90	97,28	1445,01
519,29	0,12	0,84	1,11	50,36	780,41
517,91	0,10	0,89	0,93	45,16	764,72
440,61	0,15	0,63	1,52	42,75	601,58
537,45	0,17	0,89	1,71	83,91	1246,12
453,17	0,15	0,64	1,49	44,45	624,95
544,96	0,14	0,76	1,36	58,74	846,73
484,62	0,14	0,68	1,33	46,16	651,48
545,81	0,16	0,80	1,56	69,99	1012,33
500,81	0,10	0,88	0,93	43,60	730,18
546,00	0,17	0,79	1,64	73,69	1063,31
523,13	0,09	0,86	0,88	42,17	708,64
545,70	0,17	0,79	1,59	71,38	1029,98
546,00	0,12	0,90	1,18	57,81	916,87
541,14	0,15	0,76	1,42	60,59	868,59
515,16	0,12	0,61	1,04	36,09	507,80
443,23	0,15	0,63	1,47	41,73	585,82
543,40	0,19	0,76	1,82	80,05	1159,66
485,17	0,14	0,68	1,31	45,67	645,29
519,65	0,14	0,41	1,25	29,27	404,66
546,00	0,10	0,89	0,97	47,84	806,45
277,76	0,14	0,45	2,23	17,74	274,25
545,37	0,15	0,77	1,45	63,36	912,86
490,25	0,14	0,68	1,33	46,75	659,46
519,38	0,17	0,46	1,56	40,12	568,72
525,79	0,13	0,90	1,32	62,89	966,15
514,38	0,12	0,51	1,02	30,21	416,51
515,23	0,12	0,60	1,03	35,36	496,61
541,24	0,15	0,76	1,43	61,11	876,21
524,60	0,18	0,82	1,75	79,12	1157,44
538,13	0,11	0,85	1,11	52,13	815,28
527,15	0,18	0,86	1,73	81,13	1194,90
546,00	0,19	0,86	1,84	90,31	1329,15
526,41	0,11	0,38	0,89	21,16	300,22
519,21	0,16	0,85	1,52	68,79	1016,18
532,41	0,15	0,82	1,48	66,93	980,29
537,81	0,12	0,85	1,14	53,69	835,56

545,99	0,15	0,78	1,42	62,48	902,74
523,20	0,18	0,82	1,70	76,00	1109,40
532,23	0,20	0,85	1,87	89,61	1324,06
532,81	0,20	0,86	1,88	90,71	1341,77
545,89	0,16	0,78	1,50	66,52	959,34
519,36	0,17	0,46	1,54	39,67	560,70
522,23	0,18	0,82	1,74	78,07	1141,98
514,92	0,11	0,60	1,01	34,83	490,51
519,78	0,14	0,43	1,25	30,46	419,15
541,71	0,19	0,90	1,83	92,40	1372,00
525,77	0,12	0,88	1,16	54,46	853,64
545,86	0,19	0,90	1,86	94,43	1400,97
540,01	0,19	0,75	1,81	78,53	1136,94
546,00	0,16	0,72	1,55	63,88	904,52

Tableau Résultats NSGA-II/TOPSIS

Ra*	MRR*	Pc*	Si+	Si-	Ci	Rang
0,13358431	0,1694922	0,16976163	0,05736858	0,05000281	0,46569954	89
0,13358431	0,1694922	0,16976163	0,05736858	0,05000281	0,46569954	89
0,04061867	0,02341941	0,026108	0,04869253	0,06217059	0,56078696	4
0,04093176	0,02244966	0,02492455	0,04901429	0,06240671	0,56009827	5
0,1595619	0,03098569	0,03222071	0,06090501	0,04595021	0,43002309	100
0,04063178	0,02175022	0,02493999	0,04924733	0,06246571	0,55916221	7
0,15372823	0,0323236	0,0331617	0,05932664	0,04571089	0,43518628	97
0,14331408	0,02775606	0,02973215	0,05836532	0,04703228	0,44623672	96
0,05143525	0,05709269	0,06306303	0,03972851	0,0519883	0,56683503	2
0,04498543	0,04797835	0,05163448	0,04149713	0,05554748	0,57239119	1
0,14251414	0,0275458	0,02958859	0,05826493	0,04710826	0,44706116	95
0,13358431	0,1694922	0,16976163	0,05736858	0,05000281	0,46569954	89
0,11550197	0,12849357	0,12496495	0,04383869	0,04128783	0,4850172	71
0,08652182	0,0540575	0,04995397	0,04224103	0,04799593	0,53188773	36
0,08743863	0,0491834	0,04604509	0,04360478	0,04860284	0,52710221	45
0,09644711	0,11104392	0,1112313	0,03941499	0,04134226	0,51193248	53
0,0755233	0,08354394	0,08665272	0,03714207	0,04445727	0,54482387	28
0,11830858	0,13101417	0,12888145	0,04512122	0,04124673	0,47756989	72

0,12331025	0,14757284	0,14656797	0,04957091	0,04432639	0,47207309	80
0,0867936	0,04642627	0,04383076	0,04426535	0,04917397	0,52626634	46
0,04320868	0,03038415	0,03097218	0,04642118	0,06043833	0,56558683	3
0,06887724	0,0438544	0,0406837	0,04324575	0,05309678	0,55112502	24
0,07290953	0,06305496	0,05986531	0,03886221	0,04863916	0,55586741	15
0,12557561	0,15033647	0,14895131	0,05051651	0,04487335	0,47042055	82
0,07460326	0,08588358	0,09165979	0,03741501	0,04400878	0,54049044	30
0,1075847	0,11289644	0,10842513	0,04035933	0,04051259	0,50094754	60
0,06614015	0,03961497	0,03736364	0,04431475	0,05434049	0,55081201	25
0,13250921	0,16476896	0,16459748	0,05575214	0,0485488	0,4654685	92
0,05478238	0,02661019	0,02755656	0,04786881	0,05890166	0,55166619	22
0,05918387	0,06972521	0,07854228	0,03825787	0,04795637	0,55624652	14
0,12283981	0,14575228	0,14454358	0,04902676	0,04392035	0,47253053	79
0,05651192	0,03502356	0,03394975	0,04523502	0,05699936	0,55753611	10
0,11995609	0,13286909	0,1307653	0,04575046	0,04141489	0,47513017	75
0,09085618	0,0772792	0,07364388	0,03858701	0,04351572	0,5300155	39
0,08309051	0,09570646	0,10015001	0,03786975	0,04237816	0,52809051	43
0,06702759	0,04183444	0,03917274	0,04371238	0,05376847	0,55157983	23
0,15762433	0,03100967	0,03229951	0,06048152	0,04592908	0,43162131	99
0,06041472	0,07126692	0,08014694	0,0381366	0,04750773	0,55470958	16
0,05296187	0,06779634	0,08476249	0,03954601	0,04796835	0,54811977	26
0,1093249	0,11884144	0,1150435	0,04137561	0,04074928	0,49618671	66
0,06956233	0,05790595	0,05487639	0,03970214	0,05011739	0,55797877	8
0,10481994	0,11729001	0,11653796	0,04114998	0,04076667	0,49766036	63
0,09460742	0,10343377	0,10287969	0,03852201	0,04131785	0,51750903	49
0,12192438	0,14131149	0,14072833	0,04809168	0,04288798	0,47140187	81
0,05695616	0,06519591	0,07300348	0,03866697	0,04919079	0,5598912	6
0,06395068	0,0740617	0,08130544	0,03775678	0,04678852	0,55341363	17
0,07782938	0,09062938	0,09561872	0,03741902	0,04336116	0,53677968	34
0,06221843	0,03679913	0,03514289	0,04494245	0,05560218	0,55300995	19
0,05352896	0,06560584	0,07770403	0,0390793	0,04903616	0,55649892	13

0,13256684	0,16777215	0,1679503	0,05668019	0,04950243	0,46620089	88
0,07731104	0,08684906	0,09070519	0,03727274	0,04378354	0,54016223	32
0,06477827	0,07787564	0,08888196	0,03810487	0,0455528	0,54451433	29
0,10604244	0,07373275	0,06992027	0,04146586	0,04154624	0,50048415	62
0,11903783	0,14470999	0,14483466	0,04846781	0,04394777	0,47554503	74
0,10412776	0,07665938	0,07263653	0,04072642	0,04152809	0,50487314	57
0,09507918	0,10129677	0,09841436	0,03803115	0,04160143	0,52241717	48
0,09273537	0,07960548	0,07572067	0,03855158	0,0430203	0,5273913	44
0,10843603	0,12069773	0,11766147	0,04160693	0,0409863	0,49624283	65
0,06490528	0,07519162	0,08486724	0,03811615	0,04597453	0,54672564	27
0,11427773	0,12707707	0,12358655	0,04340877	0,04119943	0,48694371	70
0,06110396	0,0727276	0,08236435	0,03812606	0,047059	0,55243256	21
0,11112554	0,12310751	0,11971321	0,0423053	0,04099353	0,49212609	69
0,08254549	0,09968981	0,10656662	0,0384356	0,04216333	0,52312515	47
0,09918219	0,10448807	0,10095469	0,03863764	0,04113076	0,51562724	50
0,07227808	0,06224723	0,05902099	0,03896775	0,04890122	0,55652431	12
0,10276255	0,07196523	0,06808888	0,04114545	0,04227563	0,50677396	56
0,1267204	0,13806022	0,1347854	0,04769216	0,041939	0,46790643	85
0,09133059	0,07876458	0,07500087	0,03845754	0,04331506	0,52970142	40
0,08688144	0,05048229	0,04703265	0,04319513	0,04850015	0,52892747	41
0,06737896	0,08251196	0,09373255	0,03802954	0,0446842	0,54022705	31
0,15541702	0,03059002	0,03187562	0,06011174	0,04607708	0,43391648	98
0,10105314	0,10926447	0,10610034	0,03925587	0,04100783	0,51091374	55
0,09242506	0,0806182	0,07664787	0,03838083	0,04300254	0,5283947	42
0,10866699	0,06919652	0,06610126	0,04266839	0,04161585	0,49375607	68
0,09231013	0,10845377	0,1122937	0,03948427	0,04128878	0,51117026	54
0,07140747	0,05209729	0,0484101	0,04120556	0,05101018	0,55316127	18
0,07166328	0,06097918	0,05772003	0,03917821	0,04923684	0,55688304	11
0,0998541	0,10539517	0,10184072	0,03877766	0,04106194	0,51430542	51
0,1218657	0,13644677	0,1345275	0,04679255	0,04192287	0,47255449	78
0,07740745	0,08990839	0,09475906	0,03736287	0,04348726	0,53787492	33

0,1206083	0,13991367	0,13888124	0,04744512	0,04273118	0,47386261	76
0,12826488	0,15575415	0,15448439	0,05234113	0,04615186	0,46858016	83
0,0622398	0,03649008	0,03489448	0,04503879	0,05565569	0,55271836	20
0,10584387	0,11863154	0,11810839	0,04153226	0,04074265	0,49520138	67
0,10329222	0,11542002	0,1139369	0,04051745	0,04090192	0,50236107	59
0,07965199	0,09258903	0,09711527	0,03748955	0,04305194	0,53453118	35
0,0992162	0,10775028	0,10492366	0,03893812	0,04115226	0,51382275	52
0,11836055	0,13107504	0,12894298	0,04514115	0,04125211	0,47749222	73
0,13014581	0,15454488	0,15389315	0,05256893	0,04564542	0,46475305	93
0,1309094	0,15643393	0,15595159	0,05321969	0,04612951	0,46431685	94
0,10479084	0,11471108	0,11150188	0,04029705	0,0408735	0,50355084	58
0,10750185	0,06842053	0,0651691	0,0425682	0,04193641	0,49626181	64
0,12103621	0,13464175	0,13272968	0,04631232	0,04163344	0,47339904	77
0,0703944	0,06007152	0,05701152	0,03928394	0,04958937	0,55797819	9
0,08699444	0,05253115	0,04871658	0,04268315	0,04814954	0,53009045	38
0,1278539	0,15934874	0,15946488	0,05355576	0,04719319	0,46842362	84
0,08067689	0,09391293	0,09921709	0,03776575	0,04269638	0,53063945	37
0,12961345	0,16286035	0,1628322	0,05475457	0,04813984	0,46785667	86
0,12629464	0,13543257	0,13214396	0,04713625	0,04142661	0,46776504	87
0,10837345	0,11017064	0,10513094	0,04019788	0,04029827	0,50062356	61

Publication

Les travaux de cette thèse ont été présentés dans un article international qui est intitulé comme suit :

*“*Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization”à été publié dans la revue international « The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021), (Springer)».https://doi.org/10.1007/s00170-021-06820-1

Auteurs: Salim Chihaoui*, Mohamed Athmane Yallese, Salim Belhadi, Ahmed belbah, Khaoula Safi، Abdelkrim Haddad*

Communications internationales :

Chihaoui Salim et al. “ Modélisation de la Rugosité de Surface Ra lors du tournage de la fonte grise Ft25 par CBN on utilise la Méthode de Surface de Réponse MSR”, ***7ème Congrès Algérien de Mécanique CAM 2019****, Ghardaïa, 24-27 novembre 2019.*

Chihaoui Salim et al. ‘’Modeling based on RSM of cutting parameters when dry turning of grey cast iron with coated CBN tools’’ **Séminaire international sur l’industrie et la technologie en ligne(Webinaire) à travers Google Meet,** *Telemcen 12 et 13 Mars2021*.

Chihaoui Salim et al. "CBN coated cutting tool performance when dry turning of grey cast iron" **AL FARABI INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED SCIENCES (via ZOOM),** *Azerbaijan 02-04 May 2021*

Chihaoui Salim et al. ‘’RSM and GA based modeling and optimization of the cutting force and surface roughness in dry turning of grey cast iron with coated CBN tool’’ **INTERNATIONAL MODERN SCIENTIFIC RESEARCH CONFERENCE (via ZOOM),** *Istanbul 04-05 June 2021.*